



HELSINGIN YLIOPISTO

MAATALOUS-METSÄTIETEELLINEN TIEDEKUNTA

# **Porolaidunnuksen vaikutus subarktisten minerotrofisten sarasoiden metaanivirtoihin**

Petri Salovaara

Maisterintutkielma

Helsingin yliopisto

Metsätieteiden maisteriohjelma

Metsien ekologia ja käyttö

Toukokuu 2020

<b>Tiedekunta</b> Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		<b>Koulutusohjelma</b> Metsätieteiden maisteriohjelma	
<b>Tekijä</b> Petri Oskari Salovaara			
<b>Työn nimi</b> Porolaidunnuksen vaikutus subarktisten minerotrofisten sarasoiden metaanivirtoihin			
<b>Oppiaine</b> Metsien ekologia ja käyttö / Metsä- ja suoekosysteemien hoito ja ennallistaminen			
<b>Työn laji</b> Maisterintutkielma	<b>Aika</b> Toukokuu 2020	<b>Sivumäärä</b> 46 s.	
<b>Tiivistelmä</b>			
<p>Metaani (CH<sub>4</sub>) on voimakas kasvihuonekaasu. Luonnontilaiset suot ovat yksi suurimmista metaanin lähteistä. Metaania syntyy suon hapettomassa kerroksessa metanogeenisten arkkien hajottaessa orgaanista ainesta. Metaani vapautuu ilmakehään diffuutoitumalla, kuplimalla tai kulkeutumalla kasvien aerenkymaattisten solukoiden kautta. Kasveista erityisesti sarojen läpi voi kulkeutua runsaasti metaania ilmakehään. Minerotrofisten saravaltisten soiden metaanipäästöjen on havaittu, muista soista poiketen, kasvavan siirryttäessä pohjoisemmille leveysasteille. Tähän on esitetty yhdeksi syyksi maankäyttöä, jossa poronhoidolla on suuri merkitys. Pohjois-Suomessa poroja elää noin 200 000 yksilöä. Suot ovat poroille tärkeä elinympäristö erityisesti kesäaikaan, sillä rehevillä sarasoilla on niille riittävästi ravintoa ja avosuot tuovat puolestaan suojaa verta imeviltä hyönteisiltä. Porojen laidunnuksen vaikutusta soiden kasvihuonekaasutaseisiin on kuitenkin tutkittu varsin vähän. Vaikutuksen voidaan nähdä tulevan ainakin kahta kautta: toisaalta porot syövät suokasveja ja vaikuttavat tätä kautta hiilenkiertoon sekä toisaalta olostavat papanoita ja tallovat niitä suohon muuttaen mahdollisesti näin turpeen mikrobikoostumusta.</p> <p>Tämän pro gradu -työn tavoitteena oli selvittää, miten porolaidunnus vaikuttaa soiden metaanipäästöihin ja lisäävätkö poron papanat suon metaanivuota joko jäädessään suon pinnalle tai tallautuessaan pinnan alapuolisiin kerroksiin. Työn aineisto kerättiin touko-elokuussa Halssiaavalta ja Lompolojänkältä. Laidunnuksen vaikutuksia tutkittiin laidunnetuilla ja laiduntamattomilla koealoilla. Koealojen alakäsittelyinä toimivat metaaninmittauspisteiden erilaiset papanakäsittelyt. Halssiaavalla osalla alakäsittelyistä käytettiin eri tasoina suon pinnanmuotojen (välipinta / jänne) vaihtelua. Mittauspisteitä perustettiin yhteensä 45 kappaletta kolmen toiston sarjoina. Mittauspisteitä mitattiin metaanin lisäksi myös vedenpinnan taso, turpeen lämpötila sekä määritettiin putkilokasvien lehtiala.</p> <p>Laidunnuksella ei havaittu olevan tilastollisesti merkitsevää vaikutusta metaanivoihin kummallakaan koealueella. Myöskään pinnalle laitettujen papanoiden ei havaittu vaikuttavan metaanivuohon. Tallonta pienensi metaanivuota Halssiaavan laiduntamattomalla koealalla. Tallonta nosti metaanivuon lyhyeksi hetkeksi erittäin suureksi, mutta kokonaisuudessaan tallonnan jälkeen vuot hieman pienenevät pidemmällä tarkastelujaksolla.</p> <p>Tässä tutkimuksessa laidunnus ei näyttänyt lisäävän soiden metaanipäästöjä. Tutkituilla soilla laidunnus ei näkynyt lehtialoissa ja koska papanalisäykselläkään ei havaittu olevan vaikutusta metaanintuotantoon, on loogista, että metaanipäästöt eivät eronneet laiduntamattomien ja laidunnettujen koealojen välillä. Suon pinnalle jäävät papanat eivät myöskään lisänneet metaanivuota. Mahdollinen papanoiden lannoitusvaikutus voi jäädä lyhyessä ajassa näkymättä. Toisaalta pinnalle jäävät papanat voivat muodostaa kasveille fyysisen esteen. Tällöin kasvien pienentynyt hiiliyhdisteiden syöte maaperään voi vähentää metaanipäästöjä, vaikka papanoilla olisikin lannoittava vaikutus. Tallontakäsittelyssä metaanivoiden puolestaan havaittiin pienenevän lehtialan pienentyessä. Tallonta turmelee kasveja, jolloin pienentynyt hiiliyhdisteiden syöte maaperään voi selittää metaanipäästöjen pienentymistä. Papanoiden mukana suolle voi tulla myös lisää mikrobeja. On kuitenkin mahdollista, että pötsin mikrobit eivät selviydy toimintakykyisinä, minkä vuoksi päästöt eivät lisääntyneet.</p> <p>Tutkimuksessa havaittiin, että porojen laidunnuksella ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta pohjoisten soiden metaanipäästöihin. Myöskään poron papanat eivät sellaisenaan merkitsevästi lisänneet päästöjä, ainakaan lyhyellä aikavälillä. Tallontakäsittelyssä havaittiin, että päästöt voivat jopa pienentyä. On mahdollista, että vaikka papanoita tulee soille jatkuvasti lisää, eivät soiden metaanipäästöt kuitenkaan kasva.</p>			
<b>Avainsanat</b> metaani, CH <sub>4</sub> , subarktinen, minerotrofinen, suo, sarasuo, poro, laidunnus, papanat, jätökset, kammionmittaus			
<b>Säilytyspaikka</b> Helsingin yliopiston kirjasto / Helda – E-thesis, ethesis.helsinki.fi			
<b>Ohjaaja</b> MMT Päivi Mäkiranta, Luonnonvarakeskus			
<b>Muita tietoja</b> Tämä tutkimus toteutettiin osana Luonnonvarakeskuksen ACAP-tutkimushanketta ( <i>Acclimation of arctic peatlands – through reindeer grazing – to a changing climate</i> ), jonka rahoittaa Suomen Akatemia.			

<b>Faculty</b> Faculty of Agriculture and Forestry		<b>Degree programme</b> Master's Programme in Forest Sciences	
<b>Author</b> Petri Oskari Salovaara			
<b>Title</b> Effects of reindeer grazing on methane fluxes in subarctic minerotrophic fens			
<b>Subject/Study track</b> Forest ecology and management / Management and restoration of forest and peatland ecosystems			
<b>Level</b> Master's thesis	<b>Month and year</b> May 2020	<b>Number of pages</b> 46 p.	
<b>Abstract</b>			
<p>Methane (CH<sub>4</sub>) is a powerful greenhouse gas. Natural peatlands are one of the largest sources of atmospheric methane. Methane is formed in the oxygen-free layer of the peatland when methanogenic archaea are decomposing organic matter. Methane is released into the atmosphere by diffusion, bubbling or transport through aerenchyma of plants. Plants, especially sedges, can transport a lot of methane into the atmosphere. Methane emissions from minerotrophic fens have been found, unlike other peatlands, to increase as they move further north latitudes. One of the reasons given for this is land use, where reindeer husbandry is of great importance.</p> <p>About 200,000 reindeer live in northern Finland. Peatlands are an important habitat for reindeer, especially during the summer, as there is enough food for them. Open peatlands also provide protection from blood-sucking insects. However, the effect of reindeer grazing on peatlands greenhouse gas balances has been relatively little studied. The effect can be seen to come from at least two reasons: on the one hand, reindeer eat plants, which affects the carbon cycle, and on the other hand they trample droppings into the peat, possibly changing the microbial composition of peat.</p> <p>The aim of this master's thesis was to find out how reindeer grazing affects the methane emissions of fens and whether reindeer grazing increases methane fluxes either by remaining on the surface of the peat or by trampling into the lower layers. The material of the work was collected in May-August from Halssiaapa and Lompolojänkkä fens. The effects of grazing were studied in grazed and non-grazed areas. The different treatments of the methane measurement plots served as sub-treatments of the study areas. In Halssiaapa, the variation of fen surface shapes (lawn / string) was used as different levels of treatments. A total of 45 measurement plots were established in series of three repetitions. In addition to methane, the water table level, peat temperature and the leaf area of vascular plants were also measured at the measuring plots.</p> <p>Grazing was not found to have a statistically significant effect on methane fluxes in either fens. Droppings placed on the surface were also not found to affect methane fluxes. Trampling reduced methane flux in Halssiaapa's ungrazed study area. Trampling increased the methane flux to a very high level for a short time, but overall after the trampling, methane flux decreased slightly over a longer period.</p> <p>In this study, grazing did not appear to increase methane emissions from fens. In the studied fens, grazing was not recognized in the leaf areas and since the addition of droppings was not found to have an effect on methane production either, it is logical that methane emissions did not differ between ungrazed and grazed areas. Surface droppings also did not increase methane fluxes. The potential fertilizing effect of droppings may go unnoticed in a short time scale. On the other hand, surface droppings can form a physical barrier for plants. In this case, the reduced input of carbon compounds by plants into the soil can reduce methane emissions, even if droppings have a fertilizing effect. In trampling treatment, methane fluxes, on the other hand, was found to decrease as the leaf area decreased. Trampling damages plants, so a reduced feed of carbon compounds into the soil may explain the reduction in methane emissions. More microbes can also be introduced to peat with the droppings. However, it is possible that the microbes in the rumen will not survive, resulting in no increase in emissions.</p> <p>The study found that reindeer grazing does not appear to have a significant effect on methane emissions from northern fens. Reindeer droppings as such did not significantly increase emissions, at least in the short term. During trampling treatment, it was found that emissions may even decrease. It is possible that although more droppings will be added to the fens, methane emissions from the fens will not increase.</p>			
<b>Keywords</b> methane, CH <sub>4</sub> , subarctic, minerotrophic, peatland, fen, reindeer, grazing, droppings, feces, chamber measurement			
<b>Supervisor or supervisors</b> D.Sc. Päivi Mäkiranta, Natural Resources Institute Finland			
<b>Where deposited</b> Helsinki University Library / Helda – E-thesis, <a href="https://ethesis.helsinki.fi">ethesis.helsinki.fi</a>			
<b>Additional information</b> This research was conducted as part of Natural Resources Institute Finland's ACAP research project ( <i>Acclimation of arctic peatlands – through reindeer grazing – to a changing climate</i> ), which is funded by Academy of Finland.			

## Sisällysluettelo

<b>Käsitteet</b> .....	4
<b>1 Johdanto</b> .....	5
1.1 Suot ja metaani.....	5
1.2 Poronhoito ja suot.....	7
1.3 Laidunnuksen ja papanoiden vaikutus soiden metaanipäästöihin.....	9
1.4 Tutkimuksen tavoitteet.....	10
<b>2 Aineisto ja menetelmät</b> .....	11
2.1 Tutkimusalueet.....	11
2.2 Koejärjestely.....	13
2.3 Metaanimittaukset.....	15
2.4 Lehtiala.....	18
2.5 Turpeen lämpötila ja vedenpinnan syvyys.....	19
2.6 Tilastolliset menetelmät.....	20
<b>3 Tulokset</b> .....	21
3.1 Mittaustulokset.....	21
3.2 Laidunnuksen vaikutus metaanivuohon ja lehtialaan.....	25
3.3 Pintapapanoiden vaikutus metaanivuohon.....	28
3.4 Tallonnan vaikutus metaanivuohon.....	31
3.5 Lehtialan kehitys.....	32
<b>4 Tulosten tarkastelu</b> .....	34
4.1 Laidunnuksen vaikutus metaanivuohon.....	34
4.2 Pintapapanoiden vaikutus metaanivuohon.....	35
4.3 Tallonnan vaikutus metaanivuohon.....	36
4.4 Metaanivuot verrattuna aiempiin tutkimuksiin.....	37
4.5 Virhelähteet.....	38
<b>5 Johtopäätökset</b> .....	39
<b>Kiitokset</b> .....	40
<b>Lähteet</b> .....	41

## Käsitteet

**Suo:** kasvitieteellisen määritelmän mukaan suo on turvetta kerryttävä kasviyhdykskunta. Ekologisesti suo voidaan puolestaan määrittellä kostean yleisilmaston ekosysteemiksi, missä hajoava, orgaaninen aines kertyy turpeeksi ja vedenpinta on korkealla. Turvetta muodostuu hapettomissa olosuhteissa tapahtuvan erittäin hitaan hajoamisen vuoksi. Hapettomuus johtuu yleensä juuri korkeasta vedenpinnan tasosta. Tässä työssä suo-termillä viitataan luonnontilaiseen suohon.

**Subarktinen ilmasto:** Köppenin ilmastoluokituksen mukainen ilmasto, missä kesät ovat viileitä ja talvet kylmiä. Neljän lämpimimmän kuukauden keskilämpötilat ovat  $\leq 10$  °C ja kylmimmän kuukauden keskilämpötila on alle 0 °C.

**Metaani (CH<sub>4</sub>):** yksinkertainen, kaasuna luonnossa esiintyvä hiilivety, mitä muodostuu orgaanisen aineen hajotessa hapettomissa olosuhteissa. Merkittävä kasvihuonekaasu hiilidioksidin sekä typpioksiduulin ohella.

**Metanogeeni:** Metaania hapettomissa olosuhteissa tuottava arkki.

**Metanotrofi:** Metaania hapellisissa olosuhteissa kuluttava bakteeri.

**Akrotelma:** Suon hapellinen pintakerros.

**Katotelma:** Vedenpinnan alla sijaitseva suon vähähappinen kerros.

**Laidunnus:** Laiduntaessaan eläimet syövät pintakasvillisuutta sekä tallovat sitä. Ne myös ulostavat maan päälle ja lisäksi tallovat ulostetta, joka painuu maaperän alempiin kerroksiin.

**Lehtiala:** Kasvillisuuden lehtipinta-alan suhde maapinta-alayksikköön (m<sup>2</sup> lehteä / m<sup>2</sup>).

**Poronhoitoalue:** Poronhoitolaissa määritelty, erityisesti poronhoidon tarpeet huomioiva alue Pohjois-Suomessa.

**Paliskunta:** Poronhoidon yksikkö. Paliskunta muodostuu tietyn alueen poronmistajista ja heidän poroistaan, joita laidunnetaan paliskunnan alueella. Paliskuntien tehtävät määritellään poronhoitolaissa.

# 1 Johdanto

## 1.1 Suot ja metaani

Luonnontilaiset suot ovat merkittävä hiilen nettositoja sekä hiilen pitkäaikainen varasto. Turusen ym. (2002) mukaan pohjoisen pallonpuoliskon boreaalisiin ja subarktisiin soihin on varastoitunut noin 270-370 petagrammaa ( $10^{15}$  grammaa) hiiltä. Vuonna 2000 Suomen ojittamattomien soiden turpeeseen oli puolestaan varastoitunut 2336 teragrammaa ( $10^{12}$  grammaa) hiiltä (Turunen 2008). Metaanin ( $\text{CH}_4$ ) kannalta suot ovat luonnollisten metaanipäästöjen suurin lähde. Turetskyn ym. (2014) mukaan maailman soiden metaanipäästöt ovat noin 55-231 teragrammaa  $\text{CH}_4$  vuodessa ja Ghoshin ym. (2015) mukaan vuosina 1901-2010 metaanipäästöt ovat olleet 141-159 teragrammaa  $\text{CH}_4$  vuodessa. Suurin osa soiden metaanipäästöistä tulee kuitenkin trooppisilta ja subtrooppisilta soilta (Turetsky ym. 2014).

Metaania syntyy pääasiassa suon hapettomassa turvekerroksessa, katotelmassa. Siellä metanogeeniset arkit pelkistävät yksinkertaisia hiiliyhdisteitä metaaniksi (Edwards ym. 1998). Aerobiset mikrobit, metanotrofit, puolestaan hapettavat osan metaanista hiilidioksidiksi sen kulkiessa kohti ilmakehää suon hapellisen turvekerroksen, akrotelman, läpi. Vedenpinnan ollessa lähellä turpeen pintaa metaania hapetetaan hiilidioksidiksi vähemmän (Drewer ym. 2010). Godinin ym. (2012) mukaan metanogeenien monimuotoisuus selittää merkittävästi metaanin tuottoa aikaisin keväällä. Lämpötilan nousu lisää myös metanogeenien aktiivisuutta (Turetsky ym. 2008), mutta toisaalta metanogeenien määrä voi lämpötilan noustessa vähetä (Peltoniemi ym. 2016). Ilmakehään metaani kulkeutuu yleensä kolmea reittiä: diffuntoitumalla ylemmän turvekerroksen läpi, kasvien (pääasiassa sarojen) solukoiden kautta tai kuplimalla märkien pintojen kautta (esim. Coulthard ym. 2009).

Metaanipäästöjen suuruus suolla riippuu monesta tekijästä, jotka voivat vaikuttaa myös samanaikaisesti. Edellä kuvattiin jo mikrobien vaikutusta, mikä on yhteydessä vedenpinnan tasoon, lämpötilaan sekä kasvillisuuden juurieritteisiin. Vedenpinnan korkealla tasolla on todettu olevan selkeä yhteys korkeampiin metaanipäästöihin (esim. Bubier 1995, Öquist & Svensson 2002, Huttunen ym. 2003, Turetsky ym. 2008) ja samalla metanogeenien aktiivisuuteen (Kotiaho ym. 2010). Metaanipäästöt ovat näin erilaisia myös suon pienmuotojen välillä. Jänteillä vedenpinnan ja turpeen pinnan välillä hapellinen kerros on paksumpi verrattuna välipintoihin ja rimpiin. Metaanipäästöjen

onkin useissa tutkimuksissa todettu olevan pienempiä jänteillä kuin välipinnoilla ja rimmillä (esim. Waddington & Roulet 1996, Saarnio ym. 1997).

Kasvillisuudella on vaikutusta metaanipäästöjen suuruuteen useiden tekijöiden kautta. Soilla fotosynteesiaktiivisuuden ja metaanintuotannon välillä on havaittu selkeä positiivinen korrelaatio (Vann ym. 2003). Suosta ilmakehään vapautuvasta metaanista valtaosa on myös peräisin hiilestä, minkä kasvillisuus on vasta hiljattain sitonut (King ym. 2002). Kasvit syöttävät hiiltä maaperään juurieritteinä, juurikarikkeena sekä karikkeena suon pinnalle. Kasvien tuottama karike on siis tärkeä metaanin substraatti ja kasvien määrän kasvaessa myös substraattien määrä kasvaa, mikä voi johtaa metaanipäästöjen kasvuun.

Kasvillisuus toimii myös metaanin reittinä ilmakehään. Soilla esiintyy korkean vedenpinnan takia aerenkymisolukollisia kasveja, jotka sekä kuljettavat metaania hapellisen kerroksen ohitse (Bubier ym. 1995) että välittävät happea kasvin toimintojen käyttöön suon hapettomaan kerrokseen. Vedenpinnan ollessa korkealla tasolla voi havaitusta metaanivuosta jopa 90 % olla kasvien solukoiden kautta kulkeutunutta metaania (Joabsson ym. 1999). Hapen kuljetus suon hapettomaan kerrokseen saattaa lisätä metaanin hapetusta ja puolestaan vähentää metaanipäästöjä (Brune ym. 2000, Blodau 2002). Eri kasvilajit kykenevät myös kuljettamaan erilaisia määriä metaania (Kao-Kniffin ym. 2010), mikä vaikuttaa eri suotyyppeiden sekä pienmuotojen metaanivoihin yhdessä muiden tekijöiden kanssa. Esimerkiksi sarojen (*Carex sp.*) on todettu kuljettavan jopa puolet enemmän metaania kuin ruohovartisten kasvien (Kao-Kniffin ym. 2010). Saarnio ym. (1997) havaitsivatkin, että rimprien ja välipintojen metaanipäästöt kasvoivat sarojen peittävyuden lisääntyessä. Myös Peltoniemi ym. (2016) havaitsivat, että sarojen suuremmalla esiintyvyydellä oli yhteys suurempiin metaanipäästöihin.

Minerotrofisella sarasuolla suurimmat metaanipäästöt ilmenevät kasvillisuuden maksimin eli käytännössä suurimpien lehtialojen aikoihin (Drewer ym. 2010). Tutkimuksessa suurimpien lehtialojen kanssa havaittiin myös korkeita turpeen lämpötiloja. Lämpötilan on muissakin tutkimuksissa todettu vaikuttavan metaanipäästöjen voimakkuuteen (esim. Dise ym. 1993, Turetsky ym. 2008). Dinsmoren ym. (2017) tutkimuksissa metaanin maksimipäästöt havaittiin ilman lämpötilan ollessa noin 12 °C. Peltoniemi ym. (2016) havaitsivat puolestaan, että pohjoisilla sarasoilla

lämpötilan nousu vähensi tilastollisesti merkitsevästi metaanivuota, mutta huomattavat, että vedenpinnan vaikutus on todennäköisesti aina lämpötilaa suurempi. Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että yksittäisten ympäristötekijöiden välisten suhteiden vaikutukset metaanivuon suuruuteen ovat monimutkaisia.

Saravaltaiset suot päästävät ilmakehään yleisesti ottaen enemmän metaania kuin karummat rahkasuot (esim. Moore ym. 1990). Tämän työn kohteena olevilla subarktisen aapasuoalueen minerotrofisilla, saravaltaisilla soilla, metaanipäästöjen vaihtelu on runsasta. Kymmeneltä suomalaiselta suolta kesä-syyskuussa kerätyssä aineistossa metaanipäästöt vaihtelivat Huttusen ym. (2003) mukaan  $-2,9$  ja  $790 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  välillä. Yhdeksältä subarktisen alueen suolta kerätyssä aineistossa (synteesi useista tutkimuksista) metaanipäästöt vaihtelivat puolestaan  $-33,3$  ja  $4\,113,5 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  välillä keskimääräisten päästöjen ollessa  $112,2 \pm 6,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Turetsky ym. 2014).

## 1.2 Poronhoito ja suot

Poronhoito on Euraasian pohjoisosien taiga- ja tundravyöhykkeellä varsin merkittävä maankäyttömuoto. Kempaisen ym. (2003) mukaan eloporoja (porojen talvikanta) on Venäjällä noin 1,2 miljoonaa ja Fennoskandiassa noin 700 000 yksilöä.

Pohjois-Suomessa poronhoidolle tarkoitettu poronhoitoalue kattaa noin 36 prosenttia koko Suomen pinta-alasta. Poronhoitolaki (1990/848) määrittelee sen tarkat rajat. Eteläraja kulkee suurin piirtein Oulun korkeudella muiden rajojen noudattaessa valtakunnanrajoja Pohjois-Suomessa. Poroilla on vapaa laidunnusoikeus poronhoitoalueen sisäpuolella maanomistajan tahdosta riippumatta lukuun ottamatta esimerkiksi viljelysalueita (Poronhoito Suomessa 2017). Poronhoitoalue on jaettu edelleen 54 paliskuntaan, joiden välisenä yhteistyöelimenä toimii Paliskuntain yhdistys (Paliskunnat 2019).

Suomessa suurimman sallitun poromäärän määrittää Maa- ja metsätalousministeriö (Poronhoitolaki 1990/848) huomioiden esimerkiksi Luonnonvarakeskuksen arviot laidunalueiden kunnosta ja kestävydestä (Poronhoito Suomessa 2017). Suurin sallittu poromäärä kymmenvuotiskaudella 2010-2020 on 203 700 eloporoa (Maa- ja metsätalousministeriön asetus... 2014). Poronhoitovuonna



1.6.2015–31.5.2016 4 421 kappaletta ja noin tuhannella kotitaloudella poronhoito muodosti merkittävän osan elinkeinosta (Poronhoito Suomessa 2017).

Suot liittyvät merkittävästi paitsi globaaliin hiilenkiertoon, myös poronhoitoon. Suot ovat tärkeitä kevät- ja kesälaitumia poroille varsinkin niissä paliskunnissa, missä soita on runsaasti (Nyström ym. 2013). Nyströmin ym. (2013) mukaan suot tarjoavat poroille muun muassa vasomisympäristön keväällä, ravintoa kesäisin ja syksyisin sekä suojaa verta imeviltä hyönteisiltä kesän pahimpaan hyönteisaikaan. Soilla on myös taloudellinen merkitys poronhoidolle, sillä kesälaidunten laadun on todettu vaikuttavan eniten porojen teuraspainoon. Poroja ei myöskään tarvitse paimentaa pois esimerkiksi pelloilta tai ruokkia ja lisäksi niiden kokoaminen poroerotuksiin on helpompaa. Poroilla mieluisimpia ovat rehevät ja vetiset suot, missä kasvaa monipuolisesti erilaisia ravintokasveja, joista tärkeimpiä ovat muun muassa tupasvilla (*Eriophorum vaginatum*), raate (*Menyanthes trifoliata*) ja kortteet (*Equisetum sp.*) (Nyström ym. 2013).



Kuva 1. Poro (*Rangifer tarandus tarandus* L.). Kuva: Petri Salovaara.

### 1.3 Laidunnuksen ja papanoiden vaikutus soiden metaanipäästöihin

Eläinten laidunnuksen sekä jätösten vaikutuksia mineraali- ja orgaanisten maiden kasvihuonekaasupäästöihin on tutkittu varsin vähän. Laidunnus ylipäättään aiheuttaa soiden jälkeen eniten metaanipäästöjä maailmassa, noin 89 teragrammaa CH<sub>4</sub> vuodessa (Ghosh ym. 2015). Märehtijöiden pötsseissä hiilidioksidia metaaniksi pelkistävät metanogeenit ovat varsin tyypillisiä (Edwards ym. 1998). Myös porojen elimistössä elää, märehtijöille tyypillisesti, erilaisia metanogeeniä (Salgado-Flores ym. 2016). Porot voivat siis papanoidensa mukana muuttaa elinympäristönsä mikrobikoostumusta.

Laiho ym. (2017) havaitsivat laboratoriossa, että borealiselta aapasuolta (Halssiaapa, Sodankylä) kerättyyn turpeeseen lisätyt, samalta alueelta kerätyt poron papanat kasvattivat metaanintuotantopotentiaalia verrattuna ilman papanoita mitattuun turpeeseen. Samoin suurempi metaanivuo tutkimuksessa mitattiin laidunnetulta alalta kerätyistä turpeista papanalisäyksellä verrattuna laiduntamattomaan alaan ja papanalisäykseen. Nimenomaan poron papanoiden vaikutusta soiden metaanivuohon ei ole ennen tätä työtä tutkittu kenttäkokeissa.

Karjan lannan vaikutuksia turpeen metaanipäästöihin on tutkittu Etelä-Suomalaisilla ja Keski-Eurooppalaisilla ennallistetuilla soilla. Keski-Euroopassa havaitut korkeat metaanipäästöt ovat olleet seurausta alueiden edeltävästä maankäytöstä eli karjan laidunnuksen yhteydessä turpeeseen päätyneistä jätöksistä sekä niiden aiheuttamasta muutoksesta turpeen mikrobipopulaatiossa (Hanh ym. 2018). Kokeessa jätösten lisääminen luonnontilaisille ja ennallistetuille soille kasvatti niiden metaanintuotantopotentiaalia. Jätösten lisäämisen todettiin kasvattavan myös metanogeenisten arkkien määrää turpeessa ja vaikuttavan sen mikrobiologiseen koostumukseen.

Porot liikkuvat usein ryhmissä ja suolla niiden on havaittu kulkevan jonoissa. Tällöin ne talloivat toistensa papanoita suon alempiin kerroksiin. Tämä voisi aiheuttaa lisäystä soiden metaanintuotantopotentiaaliin samoilla tavoilla, joita Hahn ym. (2018) ovat edellä kuvanneet. Tallonta voi aiheuttaa myös metaanin purskahduksia turpeesta ilmakehään.

Papanoilla voidaan katsoa olevan myös lannoittava vaikutus. Barthelemy ym. (2015) havaitsivat, että poron papanat lisäävät putkilokasvien tuottavuutta. Kasvien tuottavuuden kasvu voi kasvattaa metaanipäästöjä, koska metaania pääsee kulkeutumaan

kasvien solukoiden kautta suurempia määriä ja karikkeen sekä juurieritteiden määrää kasvaa.

Kun porot laiduntavat eli syövät kasveja, voi kasvien maanpäällinen biomassa hetkellisesti vähentyä. Myös tallonnalla on samanlainen vaikutus. Kasvillisuuden vähentyminen johtaisi näin pienentyviin metaanipäästöihin. Kilpailutilanne voi kuitenkin muokata kasvien allokaatiosuhteita niin, että maanpäällisen biomassan osuus suhteessa maan alaiseen kasvaa. Tämä voi taas vähentää metaanin hapetusta hapellisessa turvekerroksessa, kun happea päätyy juuristoon suhteellisesti vähemmän. Samalla orgaanisen aineen syöttö maaperään vähenee, mikä osaltaan voi vähentää metaanintuotantoa. Porot hyödyntävät ravinnokseen valikoivasti eri kasvilajeja, mistä syystä sarojen on todettu hyötyvän porojen laidunnuksesta (Kitti ym. 2009). Sarojen yleistyminen kasvattaisi näin metaanipäästöjä, koska sarojen on todettu kuljettavan metaania selvästi muita kasveja enemmän (Kao-Kniffin ym. 2010).

Sánchez ym. (2017) vertasivat Andien turvemaiden laidunnettujen sekä laiduntamattomien alueiden metaanipäästöjen eroja. Laidunnetun alueen metaanipäästöt olivat tutkimuksessa selkeästi laiduntamatonta aluetta suuremmat. Tämän arveltiin tutkimuksessa johtuvan sekä tallonnasta että jätösten lannoitusvaikutuksesta. Ma ym. (2018) puolestaan tutkivat eritasoisen lampaidenlaidunnuksen vaikutusta temperaattisen ruohomaan metaanipäästöihin Pohjois-Kiinassa. Tutkimuksessa laidunmaiden metaanipäästöt kasvoivat laidunnuspaineen kanssa.

Myös soiden pH:lla saattaa Laihon ym. (2017) mukaan olla vaikutusta papanoiden metaanintuotantoon, sillä ombrotrofisilla rahkasoilla happamuus rajoittaa mikrobiston metaanintuotantoa enemmän kuin minetrofisilla sarasoilla.

#### 1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä työssä tutkitaan porolaidunnuksen vaikutuksia soiden metaanivuohon sekä porojen laiduntamalla että laiduntamattomalla alalla.

Tutkimuksessa pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- 1) Onko laidunnetun ja laiduntamattoman alan välillä eroja metaanivoissa?
- 2) Onko porojen papanoilla soiden metaanintuotantoa lisäävä vaikutus?

- a) Lisäävätkö papanat suon metaanivuota jäädessään suon pinnalle?
- b) Lisäävätkö papanat suon metaanivuota tallautuessaan suon alempiin kerroksiin?

Tutkimuskysymyksistä voidaan muotoilla seuraavat hypoteesit:

1. hypoteesi: Mitattavat metaanivuot ovat suurempia laidunnetuilla koealoilla.
2. hypoteesi: Papanat kasvattavat soiden metaanivuota.
3. hypoteesi: Papanoiden tallominen suohon kasvattaa metaanivuota enemmän kuin papanoiden laitto suon pinnalle.

## 2 Aineisto ja menetelmät

### 2.1 Tutkimusalueet

Tutkimuksen aineisto kerättiin pohjoisborealisella kasvillisuusvyöhykkeellä sijaitsevilta soilta, Halssiaavalta (N67°22.117', E26°39.244') sekä Lompolojänkältä (N67°59.835', E24°12.546'). Lompolojänkkä sijaitsee noin 70 kilometriä Halssiaapaa pohjoisempana. Suotyypiltään Halssiaapa on ruohoinen rimpineva (RhRiN) ja Lompolojänkkä ruohoinen saraneva (RhSN). Kummatkin suotyypit ovat suhteellisen yleisiä ja niiden esiintyminen painottuu Pohjois-Suomen aapasuoalueelle (Laine ym. 2012), joten ne soveltuvat hyvin tutkimuksen toteuttamiseen yleistettävyyden kannalta. Molemmilla koealueilla suolle on tehty aitaus, minkä sisäpuolelle porot eivät ole päässeet laiduntamaan. Halssiaavan aitaus on tehty syksyllä 2001 (koko 0,5 ha) ja Lompolojänkkän syksyllä 2017 (koko 0,2 ha).

Halssiaavalla ravinteisuustaso vaihtelee oligotrofisesta eutrofiseen ja suolla havaitaan myös matalia pinnanmuotojen vaihteluita jänne- ja rimpipintojen muodossa (Räsänen ym. 2019). Koealat sijaitsivat ravinteisuustason mesotrofisella alueella, missä välipintojen kasvillisuus koostuu leväköstä (*Scheuzeria palustris*), tupasvillasta sekä mutasaroista (*Carex limosa*) ja riippasaroista (*Carex magellanica*). Jännteillä suokukka (*Andromeda polifolia*) on selvästi yleisin laji. Jännteillä kasvaa myös harvaa pienikokoista männikköä. Ruohokasveista raatetta (*Menyanthes trifoliata*) tavataan jokin verran kaikilla pinnoilla. Sammalkerros koostuu välipinnoilla pääosin hetesirppisammalesta (*Warnstorfia exannulata*) ja jännteillä rahkasammalista (*Sphagnum sp.*) (Mörsky ym. 2012).

Lompolojänkkä on mesotrofinen sarasuo (Räsänen ym. 2019), jonka turvekerros on paksuimmillaan yli 3 metriä suon keskiosissa (Aurela ym. 2009). Suolla ei esiinny havaittavaa pinnanmuotojen (jänne-rimpi) vaihtelua ja sitä reunustaa kaikissa ilmansuunnissa mäntymetsä. Koealoilla kasvillisuutta hallitsevat sarat (*Carex chordorriza*, *Carex rostrata*), raate sekä vaivaiskoivu (*Betula nana*). Aloilla kasvaa jonkin verran myös järvikortetta (*Equisetum fluviatile*) sekä kurjenjalkaa (*Comarum palustre*). Sammalkerros koostuu rahkasammalista sekä sirppisammalista. Verrattuna Halssiaapaan kasvillisuus on selkeästi korkeampaa ja rehevämpää.

Taulukko 1. Tutkimusalueiden säähavainnot vuosilta 1981-2010, 2018 ja 2019 (GHG Measurement sites 2018, Ilmatieteen Laitos 2020).

Sähävainnot	Vuosi	Sähävainto- aseman LPNN- koodi	Keskilämpötila (°C)	Sademäärä (mm)	Keskimääräinen lumensyvyys (cm)	Lumipeitteen alku (pvm)	Lumipeitteen loppu (pvm)
Halssiaapa	1981-2010	7501	-0,4	527	75	26.9. (mediaani)	14.5. (mediaani)
	2018	7501	1,5	472	27	6.10.	13.5.
	2019	7501	0,1	527	53	19.10.	15.5.
Lompolojänkkä	1981-2010	8201*	-1,4	484	72	24.10. (mediaani)	14.5. (mediaani)
	2018	8312	1,0	528	38	6.10.	22.5.
	2019	8312	-0,1	660	56	13.10.	26.5.

\*Sähävaintoasema lopetettu 2015

Tutkimusalueiden ilmasto on Köppenin ilmastoluokituksen mukaan subarktinen. Taulukossa 1 on esitetty kohteiden säähavainnot vuosien 1981-2010 keskiarvojen sekä vuoden 2018 että 2019 osalta. Mittausvuosi 2019 oli Lompolojänkkällä 1,3 °C ja Halssiaavalla 0,5 °C pitkänajan keskiarvoja lämpimämpi. Keskimääräinen lumensyvyys oli selkeästi pitkänajan keskiarvoja alhaisempi kummallakin suolla eron ollessa noin -20 cm. Lumipeitteen loppu ajoittui Lompolojänkkällä reilun viikon pitkänajan keskiarvoja myöhemmäksi. Halssiaavalla ei eroa lumipeitteen lopussa juurikaan ollut. Vuoden sademäärä oli Lompolojänkkällä selvästi keskiarvoa suurempi, mutta Halssiaavalla sademäärä ei poikennut pitkänajan keskiarvosta. Mittauksia edeltävä vuosi 2018 oli puolestaan yli asteen pitkänajan keskiarvoja lämpimämpi ja lunta saatiin alle puolet keskiarvoista. Sateisuuden suhteen vuosi 2018 poikkesi pitkänajan keskiarvoista vain hieman.

## 2.2 Koejärjestely

Tutkimusaineisto kerättiin touko-elokuun 2019 aikana. Metaania mitattiin 20.5.-31.8.2019 ja koealojen lehtialat mitattiin kolme kertaa mittauskauden aikana. Halssiaavalla lehtialat mitattiin 28.5., 15.7. sekä 21.8. ja Lompolojänkkällä 23.5., 1.7. sekä 16.8.

Tutkimuksen koejärjestelynä käytettiin split-plot -koetta. Kummallakin koealueella aitaus sekä sen ulkopuolinen ala toimivat kahtena pääkäsittelyn eli laidunnusvaikutuksen (laidunnettu/laiduntamaton) koealana. Koealojen alakäsittelyinä toimivat metaaninmittauspisteiden erilaiset papanakäsittelyt, joilla papanoita levitettiin suon pinnalle (pintapapana, kuva 3), tallottiin suohon noin 5-10 cm syvyyteen (tallonta, kuva 3) sekä kontrollikäsittely (kontrolli), jolle papanoita ei levitetty eikä pistettä tallottu. Mittauspisteet perustettiin kolmen toiston sarjoina ja ne merkittiin maastoon ennen mittausten aloittamista metallisilla rinkuloilla, minkä uraan metaaninmittauskammio mittausten yhteydessä asetettiin. Mittauspisteitä perustettiin yhteensä 45 kappaletta (kuva 2). Halssiaavalla osalla alakäsittelyistä käytettiin eri tasoina vielä suon pinnanmuotojen vaihtelua (välipinta/jänne).

Halssiaapa (27 mittauspistettä)			Lompolojänkkä (18 mittauspistettä)								
Laiduntamaton koeala			Laidunnettu koeala			Laiduntamaton koeala			Laidunnettu koeala		
Kontrolli			Kontrolli			Kontrolli			Kontrolli		
Välipinta	0	0	Välipinta	0	0	Välipinta	0	0	Välipinta	0	0
Jänne	0	0	Jänne	0	0	Pintapapana			Pintapapana		
Pintapapana			Pintapapana			Välipinta	0	0	Välipinta	0	0
Välipinta	0	0	Välipinta	0	0	Tallonta			Tallonta		
Jänne	0	0	Tallonta			Välipinta	0	0	Välipinta	0	0
Tallonta			Välipinta	0	0						
Välipinta	0	0	Tallonta								
			Välipinta	0	0						

Kuva 2. Koejärjestely. Ympyrä kuvaa yksittäistä mittauspistettä ja yhtenäinen viiva aitausta. Kokeessa papanoita levitettiin suon pinnalle (pintapapana) ja tallottiin suohon noin 5-10 cm syvyyteen (tallonta). Vertailukohtana oli kontrollikäsittely (kontrolli), jolle papanoita ei levitetty eikä pistettä tallottu.





Kuva 3. Papanakäsittelyt. Vasemmalla papanoita on levitetty suon pinnalle (pintapapana) ja oikealla tallottu suohon noin 5-10 cm syvyyteen (tallonta). Valkoinen ympyrä mittauspisteen keskellä on LAI-otantapiste. Kuvat: Petri Salovaara.

Ennen papanakäsittelyn suorittamista kaikkia mittauspisteitä mitattiin kontrollijaksona. Kontrollijakson aikana pyrittiin selvittämään, onko eri mittauspisteiden metaanivoilla lähtökohtaisesti eroa. Koska metaanivuo kehittyi ajassa siten, että suurimmat vuot ajoittuvat yleensä heinä-elokuulle, ei metaanivoiden tasoeroista ennen ja jälkeen käsittelyn vielä pystytä määrittämään käsittelyn vaikutuksia. Papanoiden vaikutusta havainnoidaan vertailemalla mittauspisteiden kontrollijakson metaanivoiden välisten erojen sekä mittauspisteiden käsittelyn jälkeisten metaanivoiden erojen välisiä eroja.

Laidunnusta tutkittiin kontrollimittauspisteiden sekä pintapapana/tallontakäsittelyjen mittauspisteiden kontrollijakson havaintojen perusteella. Papanoiden ja tallonnan vaikutusta tutkittiin puolestaan erilaisten käsittelyjen avulla. Papanakäsittelyt suoritettiin Halssiaavalla 16.7.2019 ja Lompolojänkkällä 2.7.2019. Tallontamittauspisteillä papanoita tallottiin muutaman kerran turpeen pinnalle laittamisen jälkeen, millä pyrittiin simuloimaan tilannetta, jossa porot kulkevat suolla ryhmänä jonossa ja talloivat edellä kulkevan poron papanoita suohon.

Tutkimuksessa käytetyt poron papanat kerättiin syksyllä 2018 kivennäismaalta Halssiaavan lähiympäristöstä sekä keväällä 2019 kivennäismailta Halssiaavan ja Lompolojänkkän ympäristöstä. Kevään 2019 keräyksen yhteydessä tehtiin otanta, jossa kerättiin 20 yksittäisen poron kerralla tuottamaa papanakasaa. Kerättyjen kasojen painojen keskiarvoksi mitattiin noin 100 grammaa. Papanat säilytettiin pakastimessa ja sulatettiin ennen papanakäsittelyjen suorittamista. Yhtä mittauspistettä kohti käytettiin aikaisemmin yhden keskiarvoisen kasan painoksi mitattua 100 grammaa papanoita.

### 2.3 Metaanimittaukset

Metaanivuon mittauksessa mittalaitteena käytettiin LI-7810 kannettavaa kaasuanalysaattoria (LI-COR Biosciences, USA) ja kammiona valoa läpäisemätöntä, sylinterin muotoista mittauskammiota, mikä oli varustettu tuulettimella sekä lämpömittarilla (kuva 4). Tuulettimen nopeus asetettiin mahdollisimman hiljaiseksi, jotta kaasumittaus olisi kuitenkin tasainen, mutta huokoisesta turpeesta ei vapautuisi metaania tuuletuksen vaikutuksesta.

Mittausmenetelmänä käytettiin suljetun kammion menetelmää. Mittauksissa valoa läpäisemätön metallikammio (korkeus 30 senttimetriä) asetettiin metallirinkulassa olevaan uraan (metallirinkulan halkaisija 30 senttimetriä), minkä jälkeen kaasuanalysaattori tallensi kammion metaanipitoisuuden sekunnin välein. Yksittäisen mittauksen kesto oli kolme minuuttia. Kaasun pitoisuuden muutoksen perusteella voitiin myöhemmin laskea mittauksen metaanivuo.

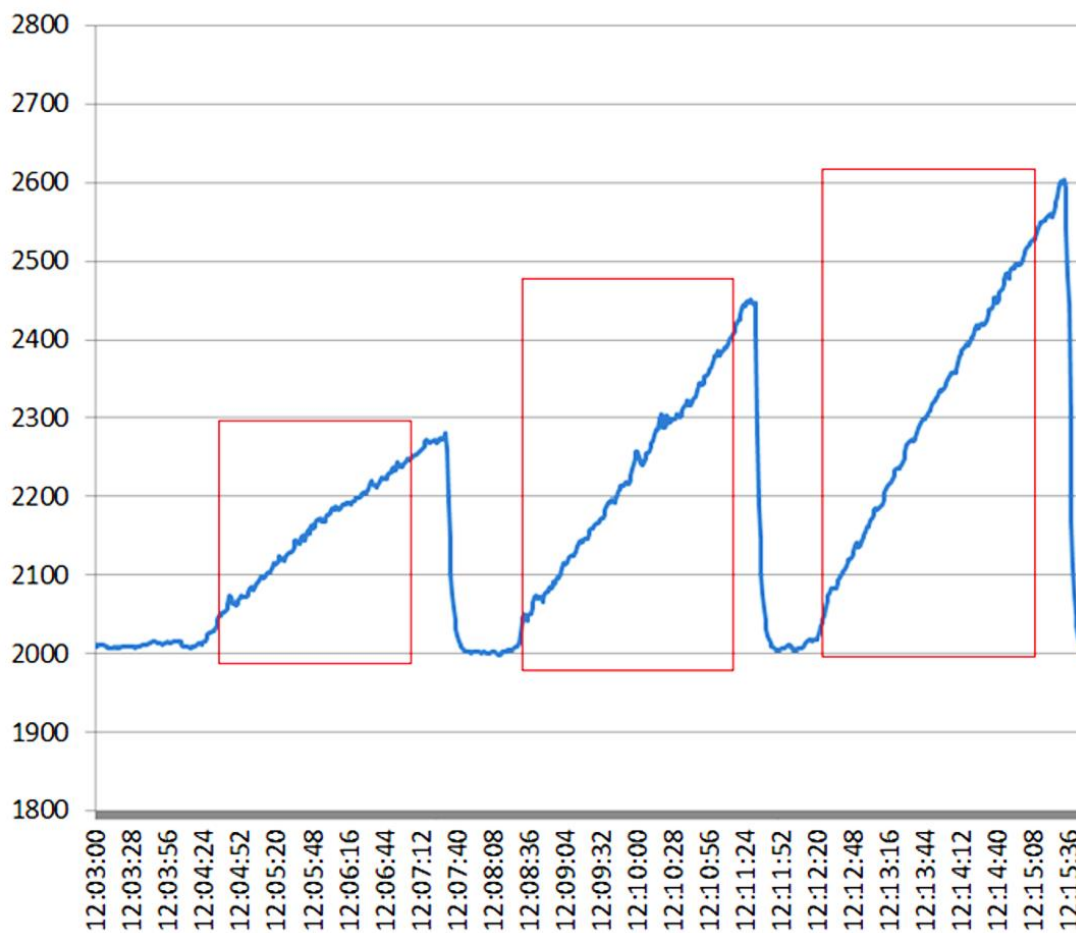




Kuva 4. LI-7810 kannettava kaasuanalysointilaitteisto yhdistettynä letkuilla mittauskammioon. Mittauskammio on kuvassa asetettu metallirinkulan uraan. Kuva: Petri Salovaara.

Mittauspisteitä mitattiin satunnaisessa järjestyksessä, jotta saatiin mahdollisimman kattava otanta metaanivoita eri ajankohdilta. Mittauksia suoritettiin koalueilla noin viikon välein. Yksittäiseltä mittauspisteeltä vuota mitattiin useita kertoja mittausviikon aikana. Metaanimittauksia tehtiin myös välittömästi tallomiskäsittelyn jälkeen.

Metaanivuoaineisto koostui yhteensä 1 128 yksittäisestä mittauksesta (Halssiaapa 802 kpl, Lompolojänkkä 326 kpl). Yksittäisten mittauspisteiden metaanivoiden laskennan suoritti Mika Korkiakoski (Ilmatieteen laitos) käyttäen Python-ohjelmistoa (Python Software Foundation). Ohjelmisto luki mittauksen alku- ja lopetusajat sekä lämpötila- ja vedenpintatiedot digitoidusta tiedostosta. Tämän jälkeen datatiedostosta luettiin kammion pitoisuustiedot tietyillä ajanhetkillä. Lopuksi ohjelmisto loi uuden tiedoston, mihin laskettiin yksittäisten mittauksen metaanivuot ja niiden selitysasteet sekä oheistiedot eli lämpötila- ja vedenpintatiedot. Ohjelmisto sovitti vuot sekä eksponentiaalisesti että lineaarisesti. Suosta ilmakehään suuntautuvat metaanin virrat eli päästöt merkittiin positiivisella etumerkillä. Jo mittausaika-aineiston digitointivaiheessa otettiin huomioon vuon mahdollinen epätasaisuus mittauksen alussa (Koskinen ym. 2014). 3 minuutin mittauksen alusta poistettiin ensimmäiset 30 sekuntia eli laskenta suoritettiin 2,5 minuutin ajalta.



Kuva 5. Kuvakaappaus kaasuanalysaattorilla mitatusta metaaniaineistosta. X-akselilla näkyy kellonaika ja y-akselilla kammion metaanipitoisuus. Punaiset laatikot rajaavat yksittäisiä mittauksia, joiden perusteella vuo lasketaan.

Metaanivuoaineistosta poistettiin selkeästi virheelliset tulokset sekä erittäin suuret vuot. Halssiaavalla raja-arvoksi asetettiin  $200 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ja Lompolojännkällä  $400 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Virheellisten tulosten syitä olivat esimerkiksi kammion huono tiiviys mittaushetkellä tai metaanikuplat mittauksen aikana. Tästä poikkeuksena välittömästi tallonnan jälkeen mitatut vuot jätettiin aineistoon. Virheelliset mittaukset tunnistettiin laskettujen selitysteiden sekä metaanivuon suuruuden perusteella. Selitysteiden ollessa alle 0,95 mittaukset tarkistettiin graafisesti. Mittaukset, joiden vuo oli aaltoileva tai joissa metaanipitoisuus muuttui mittauksen aikana epätasaisesti, poistettiin.

## 2.4 Lehtiala

Jokaiselta mittauspisteeltä määritettiin putkilokasvilajisto sekä sammalten peittävyys. Mittaukset suoritettiin kolme kertaa mittauskauden aikana molemmilla koealueilla, kuitenkin vain välipintojen mittauspisteiltä. Mittauspisteiden keskelle asetettiin otantapistee, jonka halkaisija oli 10 cm (valkoisesta muoviverkosta tehty ympyrä kuvissa 3 ja 4). Kasvien elävien lehtien lukumäärä laskettiin lajeittain otantapisteeeltä. Lehtien lukumäärä laskettiin suoraan koko mittauspisteeltä, mikäli kasveja oli vähän tai kyseessä oli isolehtinen laji, kuten raate. Pienilehtisillä kasveilla, kuten karpalolla, laskenta suoritettiin mittaamalla elävälehtisten varrenosien pituus.

Erillisiltä LAI-koepisteiltä kerättiin kasvinäytteet lehtien pinta-alojen laskemiseksi. Kasvilajien lehtien pinta-alat määritettiin GIMP-ohjelmistolla (The GIMP Team, versio 2.10.10). Lehdet asetettiin lajeittain A4-kokoiselle paperille, joka valokuvattiin. Valokuvasta määritettiin ohjelmistolla kasvin lehtien pinta-ala. Aineiston käsittely suoritettiin Microsoft Excelillä. Aluksi laskettiin yksittäisen lehden keskimääräinen pinta-ala (lehtien kokonaispinta-ala näytteessä / lehtien lukumäärä näytteessä), minkä jälkeen laskettiin mittauspisteittäin kasvilajien lehtipinta-alat kertomalla lehden keskimääräinen pinta-ala lehtien lukumäärällä. Tämän jälkeen lehtialat muunnettiin muotoon m<sup>2</sup> lehteä / m<sup>2</sup>. Koealoilta tavatut kasvilajit on esitetty taulukossa 2. Kasvilajit jaoteltiin myös toiminnallisiin ryhmiin taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 2. Koealoilla havaitut kasvilajit.

<b>Halssiaapa</b>	<b>Lompolojänkkä</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Andromeda polifolia</i></li><li>• <i>Betula nana</i></li><li>• <i>Carex limosa</i></li><li>• <i>Carex magellanica</i></li><li>• <i>Eriophorum vaginatum</i></li><li>• <i>Menyanthes trifoliata</i></li><li>• <i>Scheuchzeria palustris</i></li><li>• <i>Vaccinium oxycoccos</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Andromeda polifolia</i></li><li>• <i>Betula nana</i></li><li>• <i>Carex chordorriza</i></li><li>• <i>Carex rostrata</i></li><li>• <i>Comarum palustre</i></li><li>• <i>Equisetum fluviatile</i></li><li>• <i>Menyanthes trifoliata</i></li><li>• <i>Vaccinium oxycoccos</i></li></ul>

Taulukko 3. Kasvilajit toiminnallisten ryhmien mukaan.

<b>Sarat:</b>	<b>Ruohot:</b>	<b>Varvut:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Carex sp.</i></li> <li>• <i>Eriophorum vaginatum</i></li> <li>• <i>Scheuzeria palustris</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Comarum palustre</i></li> <li>• <i>Equisetum fluviatile</i></li> <li>• <i>Menyanthes trifoliata</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Andromeda polifolia</i></li> <li>• <i>Betula nana</i></li> <li>• <i>Vaccinium oxycoccos</i></li> </ul>

## 2.5 Turpeen lämpötila ja vedenpinnan syvyys

Turpeen lämpötila 5 ja 15 senttimetrin syvyydestä mitattiin jokaiselta mittauspisteeltä metaanimittauksen yhteydessä lämpömittarilla (CEM DT-612, CEM Industries, Intia). Turpeen lämpötilojen kehitystä koko mittausjaksolla mitattiin myös lämpötilaloggereiden (iButton, Maxim Integrated, USA) avulla. Loggereita asennettiin yhdet kappaleet 5 sekä 15 senttimetrin syvyyteen yhtä käsittelyä eli kolmea mittauspistettä kohti. Halssiaavan aineistosta poistettiin osa yhden kesäkuun mittauspäivän turpeen lämpötiloista, jotka olivat selkeästi virheelliset (mittauksen arvo yli 40 °C). Tämä johtui todennäköisesti lämpömittarin hetkellisestä häiriöstä. Tiedot korvattiin estimoimalla lämpötilat lineaarisen mallin avulla touko- ja kesäkuun mittauksista mittauspisteittäin. Lompolojängkän aineistosta yhdestä yksittäisestä mittauksesta puuttuneet turpeen lämpötilat korjattiin puolestaan lämpötilaloggeridatan perusteella.

Vedenpinnan tason mittauksia varten yhtä käsittelyä eli kolmea mittauspistettä kohti turpeeseen upotettiin osittain rei'itetty muoviputki, jonka yläpää jäi hieman turpeen pinnan yläpuolelle. Vesi nousi näin putkessa samalle tasolle kuin suossa. Putkeen puhallettiin ilmaa letkun kautta ja pulputtavasta äänestä määritettiin vedenpinnan taso. Lopuksi letkun turpeen pinnan tason alla ollut osuus mitattiin mittanauhalla. Halssiaavan aineistosta puuttuneet tiedot yhden kesäkuun mittauspäivän vedenpinnan tasoista estimoitiin laskemalla keskiarvo edellisen sekä seuraavan mittauksen arvoista toistokohtaisesti.

## 2.6 Tilastolliset menetelmät

Tilastollisena menetelmänä käytettiin yleistettyä lineaarista sekamallia (R-ohjelmisto, gamm4-paketti). Normaalisti tutkimuksen split-plot -tyyppisen koejärjestelyn aineiston tilastollisessa analyysissä käytettäisiin toistomittausten varianssianalyysiä (repeated measures ANOVA), mutta koska sen edellytykset, eli aineiston normaalijakautuneisuus sekä yhtäsuuriset varianssit, eivät pääosin täyttyneet, käytettiin sekamallia. Tilastoanalyysissä nollahypoteesina oli, että laidunnus tai papanakäsittely ei vaikuta metaanivuon suuruuteen tilastollisesti merkitsevästi. Tulos katsottiin merkitseväksi p-arvon ollessa  $<0,05$ .

```
halR_gam1 <- gamm4(flux_ch4 ~ fence_treatgroup + s(WTL) +
                  s(jday, by = fence),
                  random = ~(1+jday|plot),
                  data = dat)
lomR_gam1 <- gamm4(flux_ch4 ~ fence_treatgroup + s(WTL) +
                  s(jday, by = fence),
                  random = ~(1|plot),
                  data = dat)
```

Kuva 6. Halssiaavan (ylhäällä) ja Lompolojätkän (alhaalla) analyyseissä käytettyjen sekamallien kaavat.

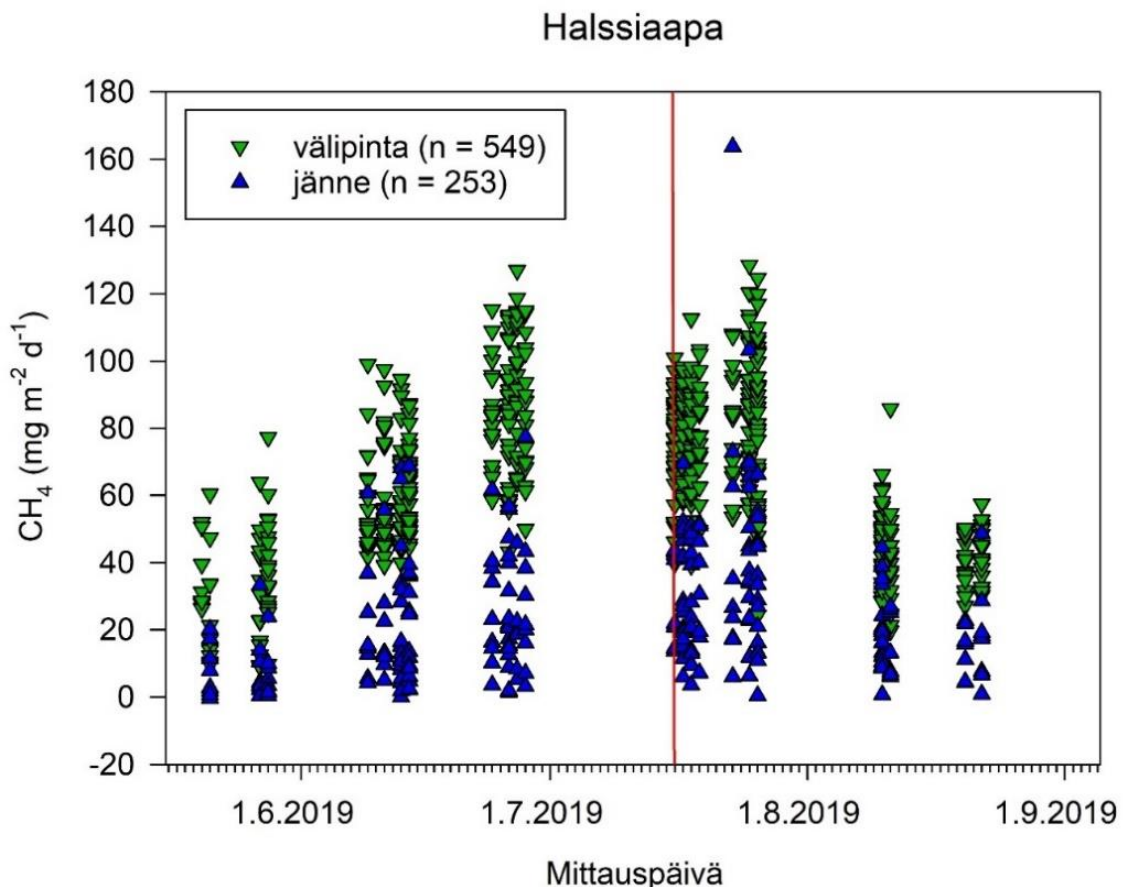
Selittävinä muuttujina mallissa käytettiin laidunnusta sekä papanakäsittelyä ja suon pienmuotoja. Vedenpinta vaikuttaa mallissa epälineaarisesti (smooth random effect) metaanivuon määrään. Toistomittausten systemaattiset poikkeamat ryhmäkeskiarvoista huomioitiin kohtelemalla pistekohtaisia keskitasoja sekä ensimmäisen asteen lineaarisia riippuvuuksia ajassa satunnaistekijöinä (random effect). Selittämätön epälineaarinen riippuvuus ajassa mallinnettiin Spline-käyrällä, joka estimoitiin erikseen laidunnetulle ja laiduntamattomalle alalle. Lehtialaa ei käytetty mallissa kovariaattina, koska porojen laidunnus on voinut vaikuttaa siihen.



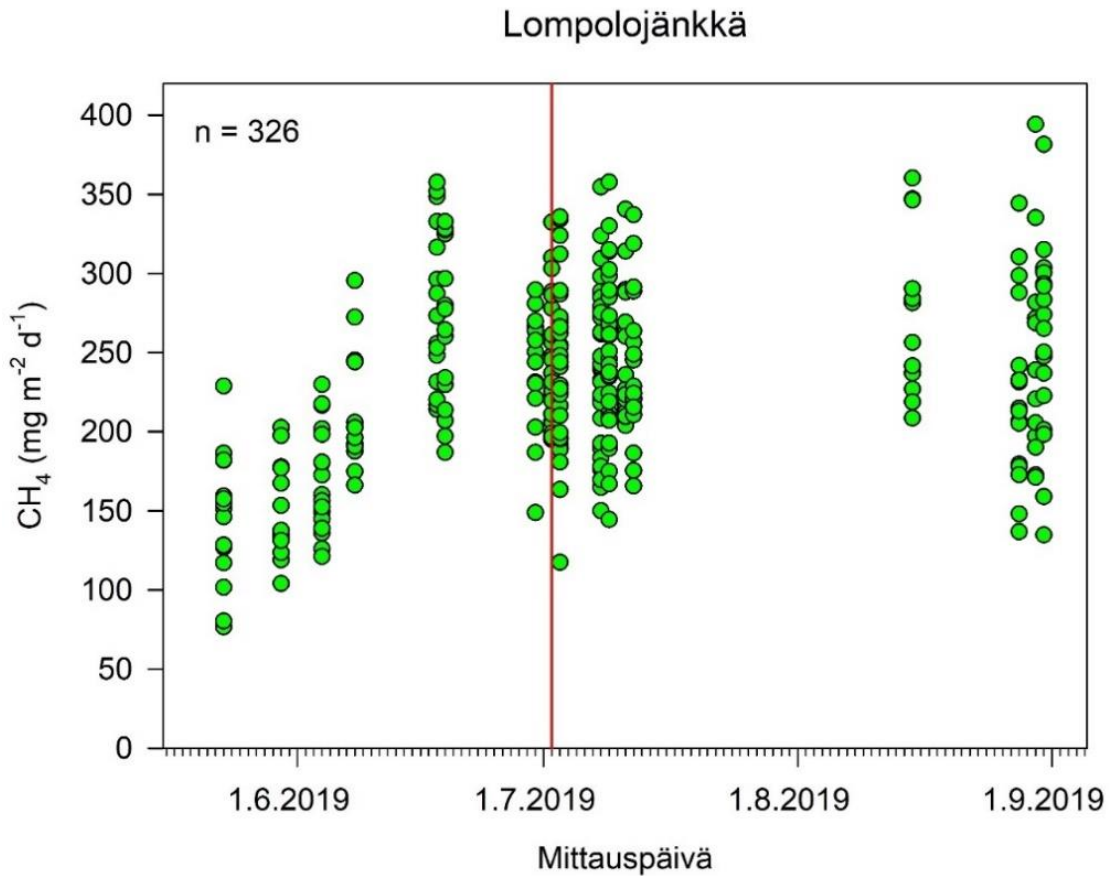
## 3 Tulokset

### 3.1 Mittaustulokset

Metaanivuo kehittyi molemmilla soilla alkukesällä varsin samankaltaisesti eli metaanivuot nousivat kohti keskikesän huippua (kuvat 7 ja 8). Halssiaavalla vuo kääntyi tämän jälkeen laskuun, mutta Lompolojänkkällä vuo pysyi loppukesälläkin varsin lähellä huippulukemia. Soiden välisissä metaanivoissa on nähtävissä selkeä tasoero, Halssiaavalla vuot ovat noin kolmasosan Lompolojänkkän voista. Suurin Halssiaavalla mitattu metaanivuo oli  $163,7 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ja pienin  $-0,38 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (eli nielu, mitattu jänteeltä). Halssiaavan jänteillä vuot olivat selvästi välipintojen voita matalampia. Lompolojänkkällä suurin vuo oli  $394,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ja pienin  $76,6 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Halssiaavalla mittauskertojen sisäinen vaihtelu on tyypillisesti noin  $40 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ja Lompolojänkkällä noin  $100 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .

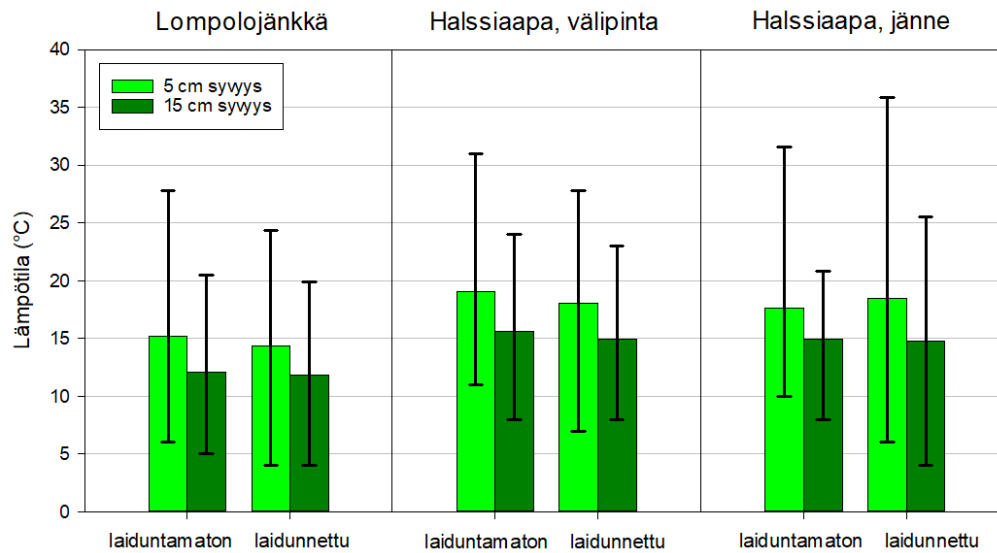


Kuva 7. Metaanivuon kehittyminen mittauskauden aikana Halssiaavalla. Kuvassa on esitetty kaikkien käsittelyjen metaanimittaukset (n=802). Punainen viiva kuvaa mittauspisteiden käsittelyiden suorittamisen ajankohtaa.



Kuva 8. Metaanivuon kehittyminen mittauskauden aikana Lompolojänkkällä. Kuvassa on esitetty kaikkien käsittelyjen metaanimittaukset (n=326). Punainen viiva kuvaa mittauspisteiden käsittelyiden suorittamisen ajankohtaa.

Kuvasta 9 nähdään, että turpeen lämpötilat olivat hyvin samanlaiset laiduntamattomilla sekä laidunnetuilla koealoilla. Lompolojänkkällä lämpötilat olivat keskimäärin matalampia kuin Halssiaavalla.

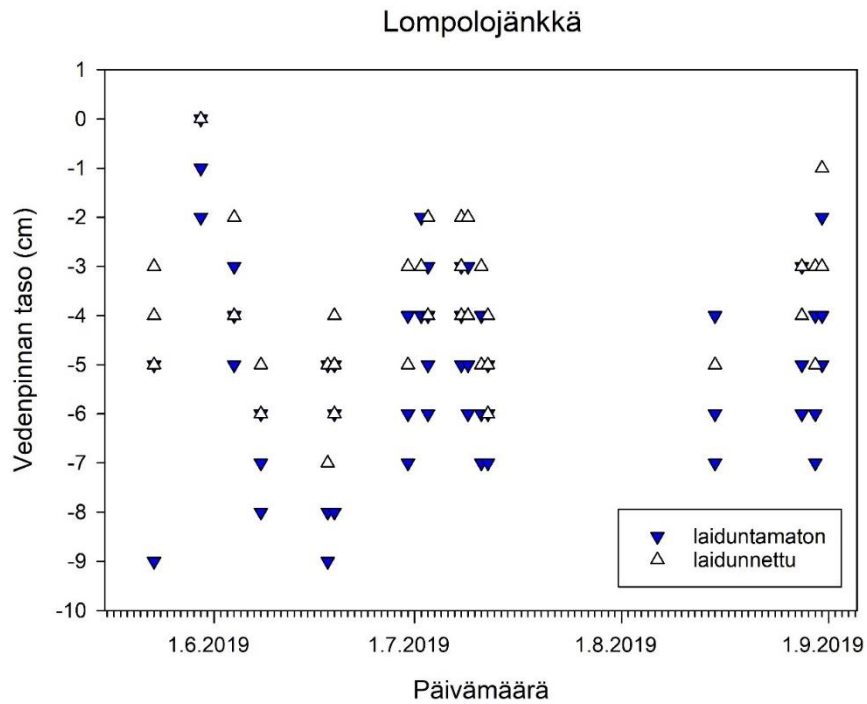


Kuva 9. Metaanimittausten yhteydessä lämpömittarilla mitatut turpeen lämpötilojen mittauskauden keskiarvot 5 ja 15 cm syvyydessä. Palkki osoittaa havaintojen minimi- ja maksimi-arvot. Turpeen lämpötilat olivat hyvin samanlaisia laiduntamattomilla ja laidunnetuilla aloilla.

Kuvista 10-12 nähdään koalueilla mitatut vedenpinnan korkeudet. Laiduntamattomilla koaloilla vedenpinta oli pääsääntöisesti muutaman sentin alempana kuin laidunnetuilla. Lompolojänkällä vedenpinta pysyi koko kesän jonkin verran lähempänä turpeen pintaa kuin Halssiaavalla.







Kuva 12. Mittauskauden metaanimittausten yhteydessä mitatut vedenpinnan tasot Lompolojänkkän mittauspisteillä. Laiduntamattoman alan vedenpinta oli yleensä muutaman sentin laidunnettua alaa alhaisemmalla tasolla.

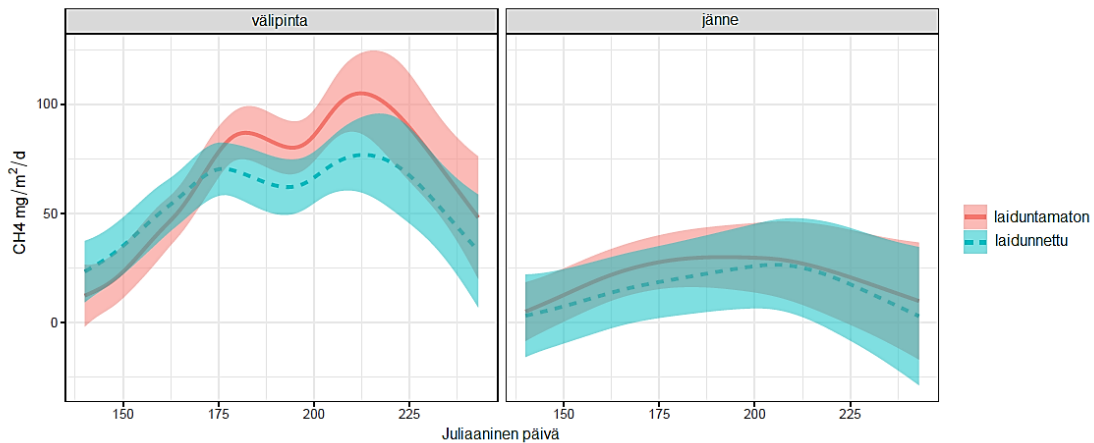
### 3.2 Laidunnuksen vaikutus metaanivuohon ja lehtialaan

Laidunnuksella ei havaittu olevan tilastollisesti merkitsevää vaikutusta keskimääräisiin metaanivoihin kummallakaan koalueella (taulukko 4). Halssiaavalla jännepintojen metaanivuot eroavat selvästi välipinnoista. Kuvissa 13 ja 15 on esitetty koalueiden keskimääräiset metaanivuot ajassa laidunnetuilla sekä laiduntamattomilla koaloilla. Halssiaavan suhteen kuvat on jaettu myös suon pienmuotojen (välipinta ja jänne) mukaan.

Taulukko 4. Laidunnusvaikutuksen tilastotestien tulokset

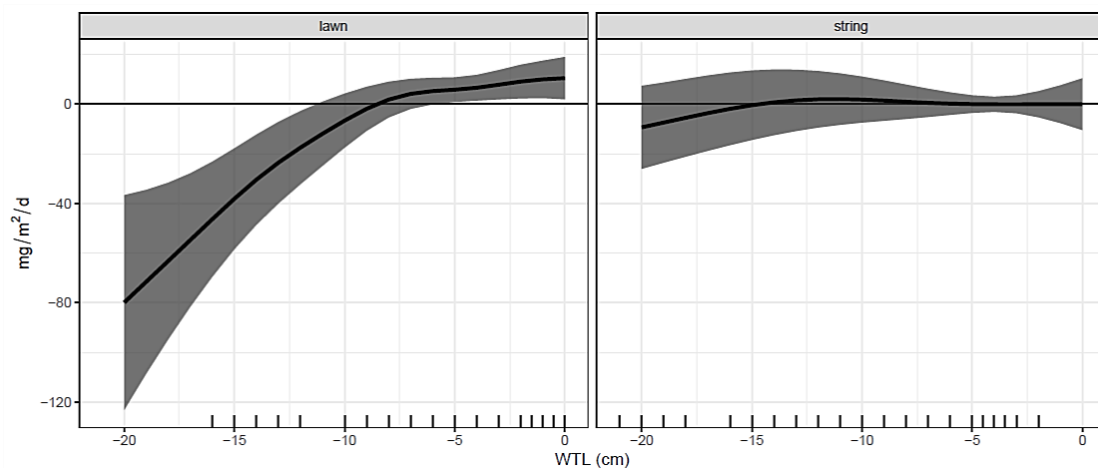
Halssiaapa				Lompolojänkkä			
	Keskimääräinen voestimaatti	SE	p-arvo		Keskimääräinen voestimaatti	SE	p-arvo
laiduntamaton; välipinta*	65,1	4,69	<0,001	laiduntamaton*	221,89	11	<0,001
laidunnettu; välipinta	-6,4	6,57	0,331	laidunnettu	-8,21	16	0,610
laiduntamaton; jänne	-42,09	7,84	<0,001	*vertailuryhmä			
laidunnettu; jänne	0,23	11,88	0,985				

\*vertailuryhmä; laidunnetun jänteen ero kuitenkin laiduntamattomaan jänteeseen



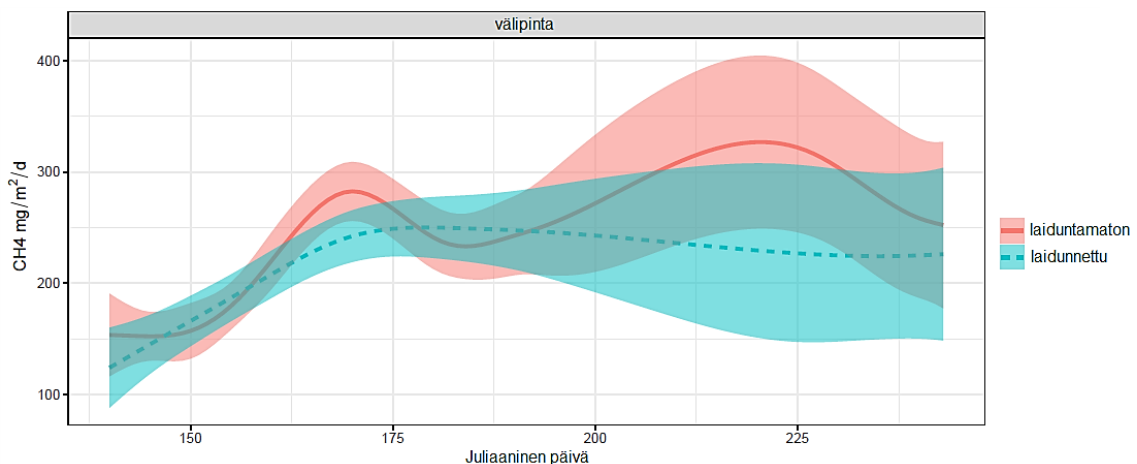
Kuva 13. Halssiaavan estimoitu keskimääräinen metaanivuo Spline-tasoituksella jaoteltuna välipinnoille ja jänteille. Käyrän ympärillä kuvattu estimaatin 95% luottamusväli. Metaanivoiden väliset erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.

Halssiaavan välipinnoilla laiduntamattomalla koealalla havaittiin ajoittain suurempia metaanivoita kuin laidunnetulla koealalla (kuva 13), mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä (p-arvo 0,331). Välipintojen osalta on myös havaittavissa, että käyrä on kaksihuippuinen. Metaanivuo on joko tilapäisesti pienentynyt ~180. päivän kohdalla tai metaanivuossa on tapahtunut äkillinen nousu ~195. päivän kohdalla. Jänteillä keskimääräiset vuot olivat hyvin samankaltaiset molemmilla koealoilla eikä kaksihuippuisuutta ole havaittavissa.



Kuva 14. Mallilla estimoitu vedenpinnan tason vaikutus metaanivuohon Halssiaavan välipinnoilla (lawn) ja jänteillä (string). Vedenpinta vaikuttaa metaanivuon suuruuteen välipinnoilla, mutta ei jänteillä.

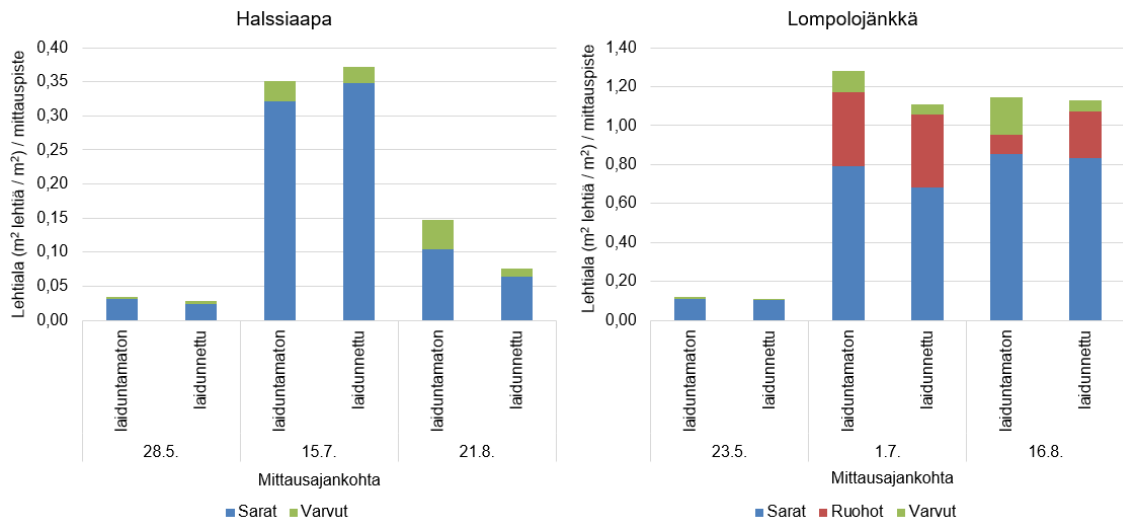
Kuten kuvasta 14 nähdään, Halssiaavalla vedenpinnan vaihtelu välipinnoilla vaikutti selvästi metaanivuohon aina noin -8 cm syvyyteen saakka. Esimerkiksi vedenpinnan laskiessa -15 cm syvyyteen, laski metaanivuo  $40 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  verrattuna keskiarvoon. Jänteillä vedenpinnan taso ei kuitenkaan vaikuttanut metaanivuon suuruuteen.



Kuva 15. Lompolojängkän estimoitu keskimääräinen metaanivuo Spline-tasoituksella. Käyrän ympärillä kuvattu estimaatin 95% luottamusväli. Metaanivoiden väliset erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.

Lompolojängkällä laiduntamattomalla koealalla havaittiin ajoittain suurempia metaanivoita kuin laidunnetulla koealalla (kuva 15), mutta ero ei ole tilastollisesti merkitsevää (p-arvo 0,610). Laiduntamattomalla koealalla käyrässä on myös havaittavissa samankaltainen kaksihuippuisuus kuin Halssiaavan välipinnoilla. Loppukesällä keskimääräisen vuon epävarmuus on varsin suurta molemmilla koealoilla.

Lompolojännkällä vedenpinnan tasolla ei havaittu olevan vaikutusta metaanivuohon, toisin kuin Halssiaavan välipinnoilla.



Kuva 16. Halssiaavan (vas.) ja Lompolojännkän (oik.) lehtialat laiduntamattomilla sekä laidunnetuilla koelaloilla eri mittausajankohtina toiminnallisten kasviryhmien mukaan eriteltynä. Lehtialat on mitattu vain välipinnoilta. Huomaa eri asteikot. Sarat ovat vallitseva kasviryhmä molemmilla soilla.

Koelajien lehtialat on esitetty kuvassa 16. Halssiaavalla toiminnallisten ryhmien osuudet ovat varsin samanlaiset sekä laidunnetuilla että laiduntamattomilla koelaloilla. Lompolojännkällä laiduntamattomalla alalla keski- ja loppukesällä varpujen määrä on hieman suurempi kuin laidunnetulla, kun taas erot muiden kasviryhmien välillä ovat varsin pieniä. Halssiaavalla koelajien väliset erot ovat varsin pieniä. Lompolojännkällä keskikesällä koelajien välinen ero oli noin  $0,2 \text{ m}^2/\text{m}^2$  niin, että laiduntamattomalla koelalla lehtiala oli suurempi. Muissa mittauksissa lehtialat olivat kuitenkin varsin samanlaiset.

### 3.3 Pintapapanoiden vaikutus metaanivuohon

Pinnalle laitettujen papanoiden ei havaittu vaikuttavan metaanivuohon tilastollisesti merkitsevästi kummallakaan koelueella. Halssiaavalla laidunnetun alan pintapapanakäsittelyn metaanivuot olivat hieman pienempiä kuin laiduntamattoman alan kontrollilla (p-arvo 0,015), mutta ne eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi laidunnetun alan kontrollista.

Taulukko 5. Pintapapanakäsittelyjen vaikutuksen tilastotestien tulokset

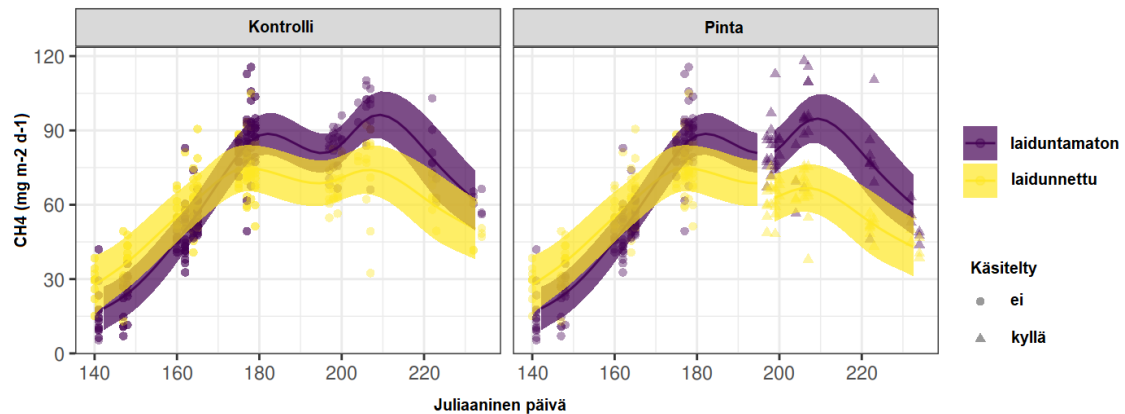
Halssiaapa, välipinnat				Lompolojäykkä			
	Keskimääräinen vuestimaatti	SE	p-arvo		Keskimääräinen vuestimaatti	SE	p-arvo
laiduntamaton; kontrolli*	69,78	3,42	<0,001	laiduntamaton; kontrolli*	235,97	10,6	<0,001
laiduntamaton; pintapapana	-1,54	2,96	0,604	laiduntamaton; pintapapana	-9,66	11,9	0,419
laidunnettu; kontrolli	-7,10	5,28	0,179	laidunnettu; kontrolli	-4,81	17,1	0,779
laidunnettu; pintapapana	-14,41	5,90	0,015	laidunnettu; pintapapana	-27,79	19	0,144

\*vertailuryhmä

Taulukko 6. Pintapapanakäsittelyjen vaikutuksen tilastotestin tulokset Halssiaavan jänteillä

	Keskimääräinen vuestimaatti	SE	p-arvo
laiduntamaton; kontrolli*	69,78	3,42	<0,001
laiduntamaton; pintapapana	-1,54	2,96	0,604
laidunnettu; kontrolli	-7,10	5,28	0,179

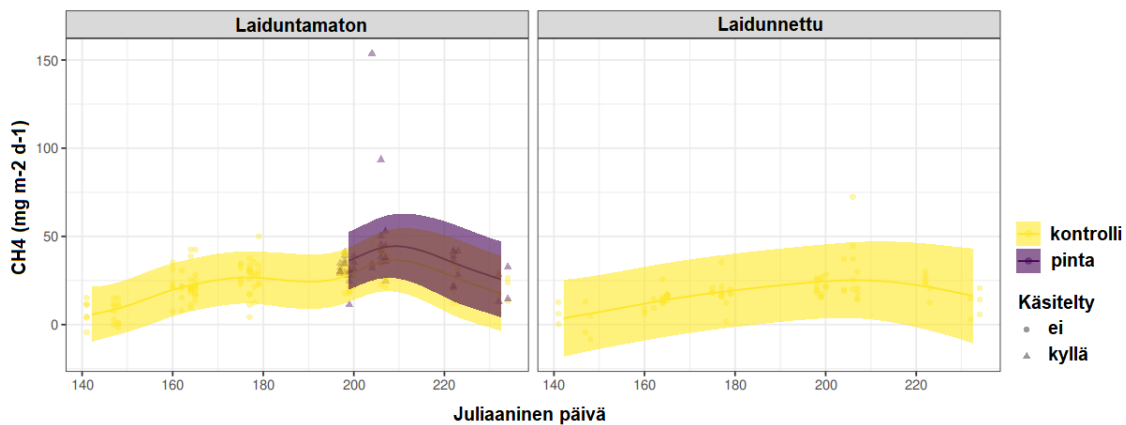
\*vertailuryhmä



Kuva 17. Keskimääräinen metaanivuo Halssiaavan välipinnoilla. Oikeassa ruudussa "ei"-pisteet kuvaavat kontrollijaksoa ja "pinta" tarkoittaa pintapapanakäsittelyä. Tarkastelussa pintapapanakäsittelyn metaanivuot eivät eronneet kontrollista.

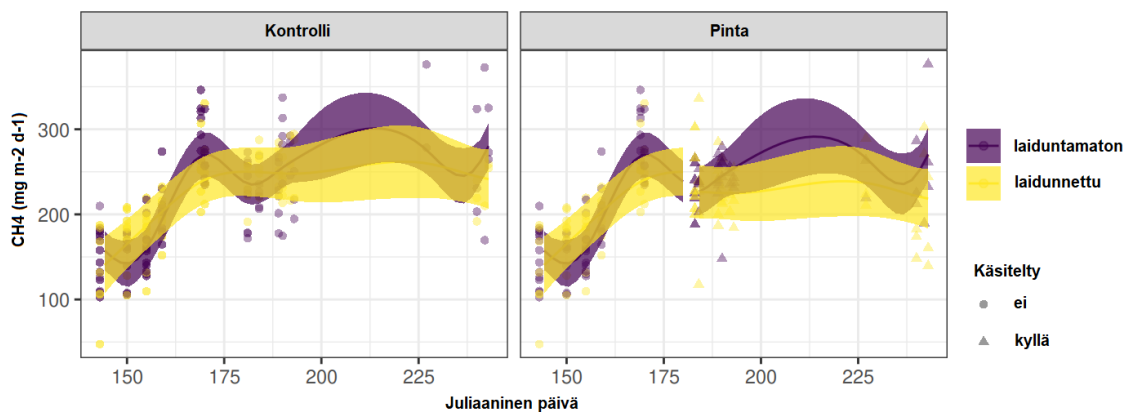
Halssiaavan välipinnoilla kontrollin ja pintapapanakäsittelyjen välillä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja kummallakaan koealalla. Halssiaavalla laidunnetun alan metaanivuot olivat kontrollijaksolla aluksi hieman laiduntamatonta alaa suuremmat,

mutta noin päivän 175 kohdalla (24.6.) laiduntamattoman alan metaanivuo nousi korkeammalle tasolle, missä se pysyi loppukesän ajan (kuva 17).



Kuva 18. Keskimääräiset metaanivuot Halssiaavan jänteillä. Vasemmassa ruudussa ”ei”-pisteet kuvaavat kontrollijaksoa ja ”pinta” tarkoittaa pintapapanakäsittelyä. Tarkastelussa pintapapanakäsittelyn metaanivuot eivät eronneet kontrollista.

Kun papanoita laitettiin suon pinnalle Halssiaavan jänteillä, käsiteltyjen mittauspisteiden metaanivuo oli ajoittain suurempi kuin kontrollilla (kuva 18), mutta havaitut erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä (p-arvo 0,604). Kontrollimittauspisteiden metaanivuot käyttäytyivät hyvin samalla tavalla Halssiaavan jänteiden eri koealoilla.



Kuva 19. Keskimääräinen metaanivuo Lompolojänkkällä. Oikeassa ruudussa ”ei”-pisteet kuvaavat kontrollijaksoa ja ”pinta” tarkoittaa pintapapanakäsittelyä. Tarkastelussa pintapapanakäsittelyn metaanivuot eivät eronneet kontrollista.

Lompolojänkkällä kontrollin ja pintapapanakäsittelyn välillä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja kummallakaan koealalla (kuva 19). Metaanivuot liikkuivat kontrollijaksolla varsin samoissa suuruusluokissa molemmilla koealoilla. Käsitelyn jälkeen laiduntamattomalla alalla havaitaan ajoittain korkeampia metaanivoita kuin

kontrollilla, mutta vuot palaavat kesän lopulla samalla tasolle. Laiduntamattomalla alalla metaanivuossa voidaan nähdä Halssiaavallakin nähty kaksihuippuisuus.

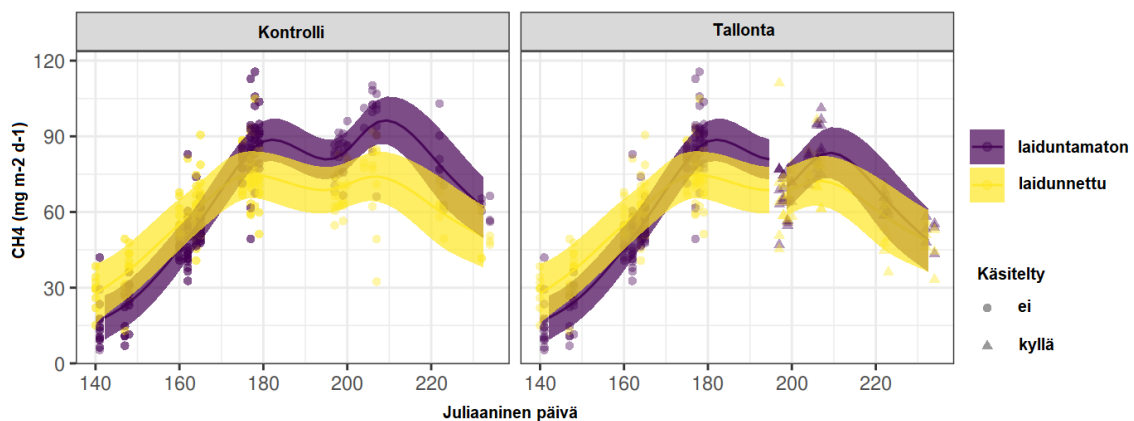
### 3.4 Tallonnan vaikutus metaanivuohon

Tallonnan havaittiin vaikuttavan metaanivuohon tilastollisesti merkitsevästi Halssiaavalla, missä metaanivuo oli toisella koealalla keskimäärin pienempi kuin kontrollilla (p-arvo <0,001). Lompolojännkällä tallottujen mittauspisteiden metaanivuot eivät eronneet kontrollista tilastollisesti merkitsevästi.

Taulukko 7. Tallontakäsittelyjen vaikutuksen tilastotestien tulokset

Halssiaapa, välipinta				Lompolojännkä			
	Keskimääräinen vuoestimaatti	SE	p-arvo		Keskimääräinen vuoestimaatti	SE	p-arvo
laiduntamaton; kontrolli*	69,78	3,42	<0,001	laiduntamaton; kontrolli*	235,97	10,6	<0,001
laiduntamaton; tallottu	-12,84	2,98	<0,001	laiduntamaton; tallottu	-18,3	11,6	0,116
laidunnettu; kontrolli	-7,10	5,28	0,179	laidunnettu; kontrolli	-4,81	17,1	0,779
laidunnettu; tallottu	-8,88	5,83	0,128	laidunnettu; tallottu	-9,33	19,3	0,630

\*vertailuryhmä

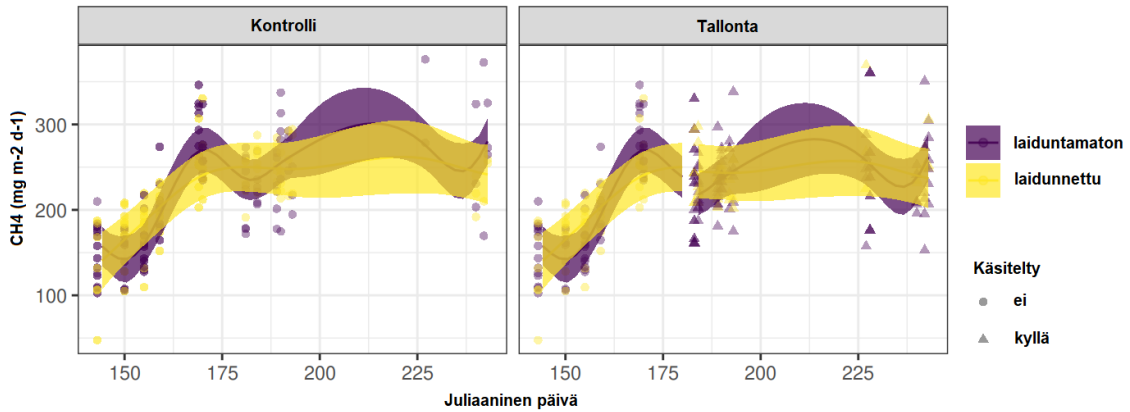


Kuva 20. Keskimääräinen metaanivuo Halssiaavan välipinnoilla. Oikeassa ruudussa "ei"-pisteet kuvaavat kontrollijaksoa. Tarkastelussa tallontakäsittelyn metaanivuot olivat kontrollia pienempiä laiduntamattomalla koealalla.

Halssiaavan välipinnoilla tallontakäsittelyjen mittauspisteiden metaanivuo pieni tilastollisesti merkitsevästi (p-arvo <0,001) laiduntamattomalla koealalla (kuva 20). Tallottujen mittauspisteiden metaanivuot olivat käsittelyn jälkeen myös lähempänä



toisiaan kuin kontrollilla. Laidunnetun alan metaanivuot olivat kontrollijaksolla aluksi hieman laiduntamatonta alaa suuremmat, mutta noin päivän 175 kohdalla (24.6.) laiduntamattoman alan metaanivuo nousi korkeammalle tasolle, missä se pysyi loppukesän ajan.

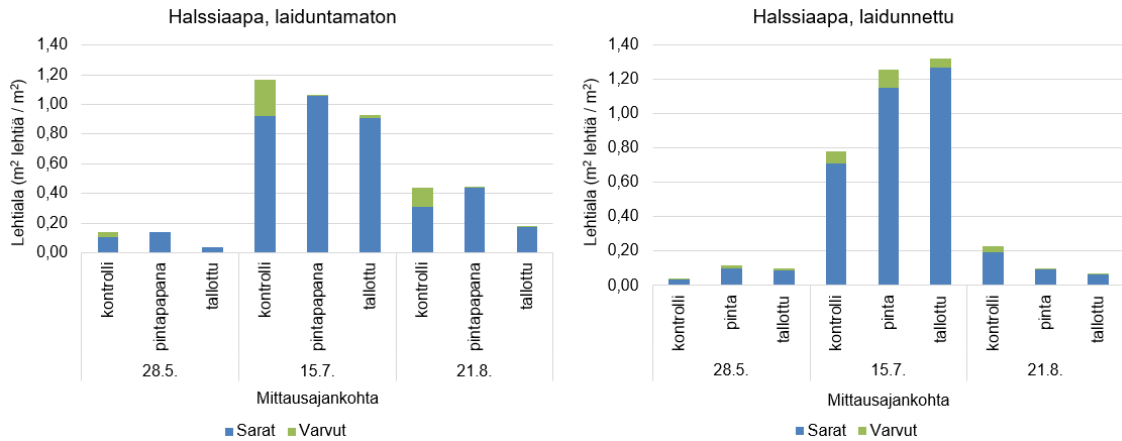


Kuva 21. Keskimääräinen metaanivuo Lompolojänkkällä. Oikeassa ruudussa ”ei”-pisteet kuvaavat kontrollijaksoa. Oikeassa ruudussa ”ei”-pisteet kuvaavat kontrollijaksoa. Tarkastelussa tallontakäsittelyn metaanivuot eivät eronneet kontrollista.

Lompolojänkkällä kontrollin ja tallontakäsittelyn välillä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja kummallakaan koealalla (kuva 21). Metaanivuot liikkuivat kontrollijaksolla varsin samoissa suuruusluokissa molemmilla koealoilla. Käsitelyn jälkeen laiduntamattomalla alalla havaitaan ajoittain korkeampia metaanivoita kuin kontrollilla, mutta vuot palaavat kesän lopulla samalla tasolle. Laiduntamattomalla alalla metaanivuossa voidaan nähdä Halssiaavallakin nähty kaksihuippuisuus.

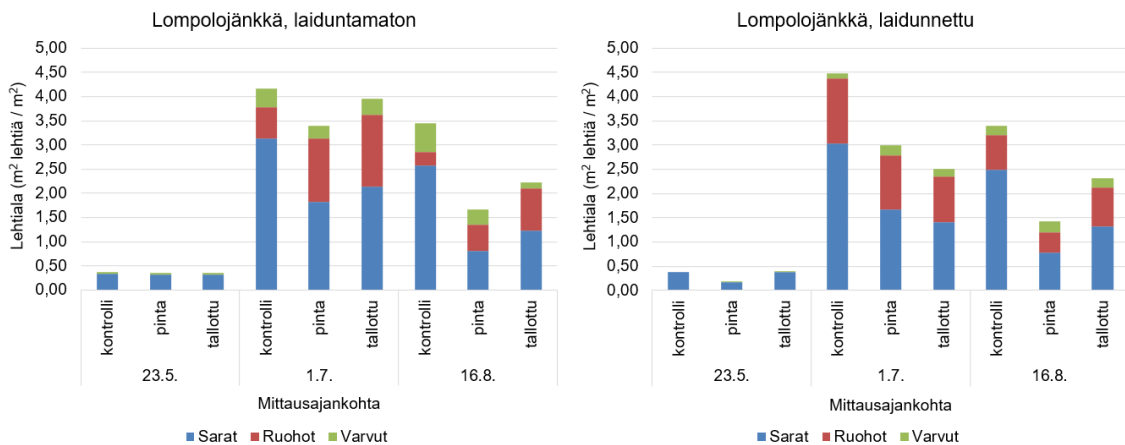
### 3.5 Lehtialan kehitys

Koealueiden lehtialat käsittelyittäin on esitetty kuvissa 22 ja 23. Käsitteyt on suoritettu Halssiaavalla 16.7. ja Lompolojänkkällä 2.7. Tasoerot mittauskertojen välillä syntyvät, samoin kuin metaanin kohdalla, ajallisesta vaikutuksesta.



Kuva 22. Halssiaavan lehtialat käsittelyittäin eri mittausajankohtina toiminnallisten kasviryhmien mukaan eriteltynä. Lehtialat on mitattu vain välipinnoilta. Sarojen osuus kasvilajistosta on Halssiaavalla huomattava.

Halssiaavalla sarojen osuus on suuri ja varvut muodostavat selkeän vähemmistön kokonaislehtialasta (kuva 22). Lehtialat käyttäytyvät eri tavalla laiduntamattomalla ja laidunnetulla alalla ja ainoa yhtäläisyys on, että tallottujen mittauspisteiden lehtialat ovat pienimpiä kesän viimeisessä mittauksessa. Laiduntamattomalla alalla kontrollien lehtialat ovat pääasiassa korkeimpia. Suurimmat erot käsittelyjen välillä ovat noin  $0,3 \text{ m}^2/\text{m}^2$ .



Kuva 23. Lompolojänkkän lehtialat eri mittausajankohtina toiminnallisten kasviryhmien mukaan eriteltynä. Sarat ovat Lompolojänkkällä suurin toiminnallinen kasviryhmä, mutta keskikesällä ruohojen osuus lehtialasta on paikoin suuri.

Lompolojänkkällä sarat ovat kaikilla käsittelyillä suurin toiminnallinen ryhmä, mutta varsinkin keskikesällä ruohojen osuus kokonaislehtialasta kasvaa merkittävästi (kuva 23). Käsittelyistä kontrollin kokonaislehtialat ovat pääasiassa suurimmat läpi mittauskauden. Ensimmäisellä mittauskerralla lehtialat eroavat toisistaan varsin vähän. Käsittelyn jälkeen

viimeisessä mittauksessa kontrollien lehtialat ovat korkeimmat ja pintapapanakäsittelyjen mittauspisteiden lehtialat puolestaan matalimmat. Kontrollin ja käsittelyjen väliset tasoerot ovat noin  $0,5-2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ .

## 4 Tulosten tarkastelu

### 4.1 Laidunnuksen vaikutus metaanivuohon

Laidunnuksella ei havaittu olevan vaikutusta metaanivoihin. Tämän tutkimuksen 1. hypoteesi siis kumoutuu.

Halssiaavalla kesän lopulla laiduntamattoman alan lehtiala oli laidunnettua alaa hieman suurempi, mikä osaltaan saattaisi selittää laiduntamattoman alan ajoittain korkeampia metaanipäästöjä. Yhteyttävän lehtialan ollessa suurempi metaanintuotanto saa enemmän substraatteja kasvin juurien kautta ja metaania myös karkaa enemmän kasvien solukoiden kautta ilmakehään. Suurin osa soiden päästämästä metaanista on peräisin lähiaikoina sidotusta hiilestä (King ym. 2002). Laidunnus saattaa vaikuttaa siihen, miten kasvit allokoivat kasvuaan. Laidunnuksen takia maanpäällisiin osiin kannattaa allokoida enemmän, jotta fotosynteesin tehokkuus turvataan. Tämä voi vähentää juurten biomassaa, mikä pienentää juuristokerrokseen syötettyjen hiiliyhdisteiden määrää. Vähentynyt orgaanisen aineen syöte maaperään voi selittää laidunnettujen alojen ajoittain hieman pienempiä metaanivoita.

Metaanivoiden välinen ero oli tarkastelussa kuitenkin varsin pieni ja lehtialoja tarkemmin tarkasteltaessa huomataan, että sarojen lehtialat koealojen välillä olivat lähellä toisiaan ja erot havaittiin varpujen osalta. Kasvilajien osalta juuri sarojen suuremman lehtialan on aiemmin havaittu vaikuttavan kasvattavasti metaanipäästöihin (esim. Saarnio ym. 1997, Peltoniemi ym. 2016).

Lompolojänkällä keskikesän lehtialamittauksessa laiduntamattoman alan lehtiala oli jonkin verran suurempi. Metaanivuo laiduntamattomalla alalla lähtee nousuun lehtialamittauksen jälkeen toisin kuin laidunnetulla alalla, eli suurempi lehtiala näyttäisi korreloivan metaanipäästöjen kanssa. Kesän lopulla metaanivuot olivat palanneet varsin samalle tasolle, samoin kuin lehtialat.

Kuten johdannossa todetaan, metaanivuohon vaikuttavat lisäksi muut tekijät, kuten lämpötila ja vedenpinta. Turpeen keskimääräisillä lämpötiloilla ei kuitenkaan ollut eroa laiduntamattoman ja laidunnetun alan välillä kummallakaan soolla. Halssiaavalla lämpötilat olivat jonkin verran korkeammalla tasolla kuin Lompolojänkkällä. Lämpötilalla on kuitenkin todennäköisesti merkitystä kesän alussa mikrobien aktivoituessa ja metaanintuotannon käynnistyessä.

Vedenpinta oli Lompolojänkkällä suurimman osan mittauskaudesta lähempänä turpeen pintaa kuin Halssiaavalla. Myös koelajien välillä havaittiin eroja vedenpinnan tasossa. Molemmilla soilla laiduntamattoman alan vedenpinta oli laidunnettua alaa muutamia senttejä matalammalla. Tilastanalyysin perusteella vedenpinta vaikutti metaanivuon suuruuteen Halssiaavan välipinnoilla, mutta ei jänteillä eikä Lompolojänkkällä. Esimerkiksi Huttusen ym. (2003) ja Turetskyn ym. (2008) tuloksia vedenpinnan tason vaikutuksesta korkeampiin metaanipäästöihin ei siis täysin voida yleistää kaikille soille, vaikkakin korkea vedenpinta on edelleen yhteydessä metaanintuotantoon. Tilastanalyysillä luodussa mallissa vedenpinnan vaikutus metaanivuon suuruuteen poistettiin. Vaikkakin estimoidut metaanivuot olivat laiduntamattomilla aloilla hieman suurempia, ei ero ollut tilastollisesti merkitsevä.

#### **4.2 Pintapapanoiden vaikutus metaanivuohon**

Papanoiden laittamisella suon pinnalle ei havaittu olevan vaikutusta koelajien metaanivoihin. Tämä voi johtua siitä, että papanat eivät talloutuneet suon alempaan, mahdollisesti hapettomampaan kerrokseen. Siellä vaikutuksen arveltiin olevan suurempi, koska metanogeeniset arkit vaativat toimiakseen hapettomat olosuhteet.

Pinnalla olleet papanat säilyivät suon pinnalla koko tarkastelujakson ajan ja ne ovat voineet muodostaa fyysisen esteen putkilokasvien sekä sammalten kasvulle. Tähän viittaisi se, että Lompolojänkkällä pintapapanamittauspisteiden lehtialat olivat pääsääntöisesti pienempiä kuin tallottujen tai kontrollimittauspisteiden. Toisaalta pintapapanamittauspisteiden lehtialat olivat matalammalla tasolla jo ennen papanoiden laittoa. Halssiaavalla lehtialojen eroja on vaikeampi tulkita, koska lehtialat olivat selvästi matalampia kuin Lompolojänkkällä. Lehtialojen erot käsittelyn jälkeen olivat varsin pieniä ja sarojen osuuden ollessa suuri, on loogista, ettei eroja metaanivoissa havaittu.

Metaania kuljettavien kasvien määrän vähentyminen vähentää kasvien juuristolle päätyvien hiiliyhdisteiden määrää. Metaania myös hapettuu enemmän hapellisessa kerroksessa sen kulkiessa suosta kohti ilmakehää, koska vaihtoehtoisia kanavia, eli kasveja, on vähemmän. Papanat voivat myös lisätä ruohojen määrää (Van Der Wal ym. 2004), eli sarojen vähentyessä metaania kulkisi vähemmän suon hapettomasta kerroksesta ilmakehään. Papanoiden asettamisella pinnalle pitäisi näin olla metaanivuota pienentävä vaikutus, mutta sitä ei mahdollisesti nähdä vielä puolikkaan kasvukauden aikana.

Suon pinnalla lannoitusvaikutus voi myös jäädä pieneksi tai olemattomaksi, koska papanat eivät mahdollisesti sisällä kovinkaan runsaasti kasveille käyttökelpoisia ravinteita. Pohjoisissa oloissa poron ruoansulatusjärjestelmä voi toimia huomattavan tehokkaasti ravinteiden talteenotossa. Vaikutuksessa voi myös kulua pitemmän aikaa kuin vain osa yhdestä kasvukaudesta, jos papanoiden sisältämät ravinteet liukenevat hiljalleen kasvien juurten käytettäväksi.

#### **4.3 Tallonnan vaikutus metaanivuohon**

Halssiaavalla tallonta vähensi metaanipäästöjä laiduntamattomalla alalla. Lompolojänkkällä tallonnan ei havaittu vaikuttavan metaanivoihin. Halssiaavalla vaikutus oli kuitenkin päinvastainen hypoteesin kanssa eli metaanivuo laski verrattuna kontrolliin. Näin ollen 2. sekä 3. hypoteesi kumoutuvat.

Hahnin ym. (2018) tutkimuksessa Keski-Euroopassa ja Etelä-Suomessa luonnontilaisille sekä ennallistetuille soille lisätty karjanlanta lisäsi soiden metaanipäästöjä, mutta tässä tutkimuksessa vaikutus todettiin jopa päinvastaiseksi. Miksi vaikutusta ei siis joko havaittu tai se oli päinvastainen? Tässä tutkimuksessa papanoiden vaikutusta havainnoitiin varsin lyhyen aikaa, vain noin kaksi kuukautta. On siis mahdollista, että metaanintuotanto ei vielä ehtinyt kasvaa, vaan korkeammat päästöt havaitaan vasta myöhemmin tai seuraavalla kasvukaudella. Toisaalta ilmasto voi Pohjois-Suomessa rajoittaa papanoiden oletettua mikrobitoiminnan lisäystä eli poron pötsin mikrobit eivät välttämättä selviydy pitkiä aikoja pötsin ulkopuolella. Karjanlanta on myös todennäköisesti ominaisuuksiltaan erilaista kuin poron papanat. Myöskin tutkimuksissa käytetyillä jätösten määrillä oli eroa, sillä Hahn ym. (2018) käyttivät enemmän lantaa kuin tässä tutkimuksessa käytettiin papanoita.

Tässä tutkimuksessa simuloitiin myös porojen aiheuttamaa tallontaa, mitä esimerkiksi Hahn ym. (2018) eivät tehneet. Tallonnan havaittiin pienentävän lehtialoja kaikilla koelajoilla verrattuna kontrolliin. Tallonta voi vahingoittaa kasveja ja siten vähentää niiden määrää. Kasvien määrän ja lehtialan suhdetta metaanipäästöihin pohdittiin jo pintapapanoiden yhteydessä kappaleessa 4.2. Tallonnan kasvillisuudelle aiheuttama vähentyminen sopiikin hyvin yhteen pienentyneiden metaanipäästöjen kanssa.

Tässä tutkimuksessa ei selvitetty, vaikuttiko papanalisäys pinnalle tai papanoiden tallonta turpeen mikrobikoostumukseen, joten sen osuus jää selvittäväksi myöhemmissä tutkimuksissa. Myöskään siihen, miksi tallonta vaikutti pienentävän voita, ei saatu suoraa vastausta. Mittauksista tiedetään, että tallonta aiheutti lyhytkestoisen metaanin purskahduksen turpeesta ilmakehään. Vuot olivat monesti niin suuria, että mittalaite ei pystynyt niitä mittaamaan eli käytännössä jopa yli  $800 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Aiheutuuko vuon pienentyminen ”metaanivaraston” tyhjenemisestä ja palautuuko se myöhemmin ennalleen? Papanoiden yli kasvukauden ylittyvä vaikutus jää näin ollen myös seuraavissa tutkimuksissa selvittäväksi.

#### 4.4 Metaanivuot verrattuna aiempiin tutkimuksiin

Halssiaavalla metaanivuot olivat alhaisemmalla tasolla kuin aikaisempina vuosina tehtyjen tutkimusten mittauksissa. Keskimääräiset metaanivuot olivat kesällä 2019 välipinnoilla  $67 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ja jänteillä  $25 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Suurimmat mitatut vuot olivat  $128 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (välipinta) sekä  $164 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (jänne) ja pienimmät  $9 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (välipinta) sekä  $-0,4 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (jänne). Mörskyn ym. (2012) mittauksissa vuosina 2003, 2004 ja 2005 metaanivuot olivat huippuaikoina keskimäärin 150, 200 ja  $250 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Suurimmat päästöt ilmenivät märempinä kesinä. Fisherin ym. (2017) mittauksen mukaan heinäkuussa 2012 Halssiaavan metaanipäästöt olivat välipinnoilla noin  $50\text{-}170 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ja jänteillä noin  $35\text{-}60 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Puolestaan Dinsmoren ym. (2017) mittauksissa metaanivuo oli samana vuonna heinä-elokuussa Halssiaavalla keskimäärin  $80 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Vertailuna viimeiseen voidaan todeta, että kesän 2019 mittauksissa heinä-elokuun keskimääräinen metaanivuo oli noin  $60 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Alhaisemmat vuot saattavat johtua esimerkiksi siitä, että vuoden 2018 loppukesä sekä syysy olivat kuivia ja lämpimiä.

Lompolojänkällä tässä tutkimuksessa mitatut metaanivuot olivat varsin samaa tasoa aiempien tutkimusten kanssa. Kesällä 2019 metaanivuo oli keskimäärin  $231 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .

Suurin mitattu vuo oli  $394 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ja pienin  $77 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Metaanivoiden mittauksissa Lompolojänkkällä läpi vuoden vuosina 2006, 2007 ja 2008 metaanivuot vaihtelivat väleillä 5,0–360, 4,7–576 sekä -3,5–370  $\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Drewer ym. 2010). EC-tekniikalla vuosina 2006-2010 mitatut kesän keskimääräiset metaanivuon suurimmat arvot olivat puolestaan 192-288  $\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Li ym. 2016). Kesän 2019 mittauksissa mitatut metaanivuot asettuvat varsin hyvin edellä esitettyjen tulosten lomaan.

#### 4.5 Virhelähteet

Tutkimuksessa voidaan nähdä useita erilaisia virhelähteitä, mitkä vaikuttavat tuloksiin ja niiden luotettavuuteen. Mittausdataa saatiin uuden mittauslaitteen ansiosta paljon enemmän verrattuna aiempiin tutkimuksiin. Mittauslaite todettiin myös varsin tarkaksi. Joitakin mittauksia jouduttiin kuitenkin poistamaan mittauksen epäonnistumisen takia. Metaanidataa ei täydennetty mallintamalla, joten jotkin mittauspisteet ovat datassa aliedustettuna muihin nähden. Vedenpinta- ja lämpötiladataa puolestaan mallinnettiin kappaleessa 2.5 kerrotulla tavalla. Koska mittaukset, joiden perusteella mallinnukset tehtiin, oli tehty varsin lyhyen aikaa ennen ja jälkeen puuttuvia mittaustuloksia, voidaan mallinnettua tulosta pitää varsin luotettavana.

Vertailukohtana eli kontrollina tallontuilla mittauspisteille käytettiin tässä tutkimuksessa täysin käsittelemättömiä mittauspisteitä. Täysin varmasti ei siis voida sanoa, että papanat olisivat aiheuttaneet metaanivuon pienenemisen, koska emme mitanneet ilman papanoita tallottuja mittauspisteitä.

Mittalaitteen ongelmaa tallontamittauspisteiden mittauksessa kuvattiin jo aiemmin kappaleessa 4.3. Metaanivoita mitattiin välittömästi tallonnan jälkeen, mutta mittalaitteen analysointikapasiteetti ei monesti riittänyt, koska vuot olivat hyvin suuria. Tämä aiheuttaa harhaa, sillä todellisia ilmakehään purkautuneiden metaanivoiden suuruutta on hyvin vaikea arvioida. Tallonnan välittömän vaikutuksen kesto myös vaihteli hieman mittauspisteittäin.

Kappaleessa 2.2 kuvattiin tutkimuksessa käytettyjen papanoiden keräys, säilytys sekä käytetty määrä. Yhden poron tuottamaksi yksittäisen papanakasan painoksi oli pienellä otannalla saatu keskimäärin 100 grammaa, mikä tarkoittaa, että yhdellä mittauspisteellä tutkittiin yhden poron ulostuskerran vaikutusta. Ekosysteemitason päätelmien tekemiseen

tarvittaisiin siis tietoa porojen todellisista laidunnusmääristä. Myöskään laidunnettujen alojen laidunnuspainetta ei pystytty määrittämään. Papanoiden laadun, eli esimerkiksi porojen ravinnon, vaikutuksesta ei ole saatavilla tietoa, mutta sillä saattaa olla merkitystä mikrobien toimintaan. Papanat kerättiin myös useista eri lähteistä eikä siitä, mistä kerättyjä papanoita kullekin mittauspisteelle on laitettu, ole tietoa. Myöskään siitä, onko pakastamisella vaikutusta papanoiden mikrobistoon, ei ole tarkkaa tietoa. Pakastaminen on kuitenkin yleisesti käytetty toimintatapa siihen, miten esimerkiksi näytteitä toimitetaan analysoitavaksi.

Mittauspisteiden lehtialan mittaaminen mittauspisteiden kasveista ei ollut mahdollista ilman, että kasveja olisi poistettu mittauspisteeltä. Tästä syystä kasvit kerättiin erillisiltä LAI-pisteiltä, missä kasvit kuitenkin saattoivat olla erikokoisia kuin mittauspisteillä. Tulokset voivat näin ollen olla virheellisiä, mutta mittaustapa on yleisesti käytetty ja virhe toistuu samanlaisena kaikissa mittauksissa.

Vedenpinnan tasoissa havaittiin pieniä eroja laiduntamattoman sekä laidunnetun alan välillä. Vedenpinnan mittaus suoritettiin aina samalla tavalla, mutta siihen vaikuttivat putkien asettelu sekä suon pinnan määrittäminen. On siis mahdollista, että tulokset eroavat toisistaan enemmän tai vähemmän. Muutaman senttimetrin erot eivät todennäköisesti kuitenkaan vaikuta merkittävästi metaanivuon suuruuteen.

## 5 Johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa havaittiin, että porojen laidunnus ei merkittävästi vaikuta pohjoisten soiden metaanipäästöihin. Myöskään poron papanat eivät merkittävästi lisääneet päästöjä, ainakaan lyhyellä aikavälillä. Toisin kuin tutkimuksen hypoteeseissa esitettiin, yhden koealan tallontakäsittelyssä havaittiin, että päästöt voivat jopa pienentyä. Ero kontrolliin oli tilastollisesti merkitsevä, mutta ei kuitenkaan kovin suuri.

Tutkimus toi usean lähteen tavoin esille sen, että soiden metaanivuon määrittämisessä erilaisia tekijöitä on runsaasti ja niiden huomiointi voi olla vaikeaa. Soilla metaanivoiden vaihtelu on luontaista ja saman ilmastoalueen sisällä esiintyy isojakin eroja metaanipäästöjen suuruuksissa. Laboratoriossa on useissa tutkimuksissa saatu selkeitä tuloksia eläinten jätösten metaanintuotantopotentiaalia kasvattavasta vaikutuksesta.



Tämän tutkimuksen perusteella näyttäisi kuitenkin siltä, että pohjoisilla soilla vaikutus ei, ainakaan kovin selkeästi, näy *in situ* -kokeissa.

Papanoilla ei vaikuta olevan suurta vaikutusta soiden metaanipäästöihin. Laidunnetuille alueille papanalisäystä tulee luonnostaan porojen laidunnuksen yhteydessä. On mahdollista, että vaikka papanoita tulee alueelle jatkuvasti lisää, eivät metaanipäästöt kuitenkaan kasva. Tällöin laidunnuksen vaikutus kasvillisuuteen eli porojen syönti ja tallonta mahdollisesti määräävät vaikutukset metaanipäästöihin.

Tutkimuksessa jää vielä avoimeksi useita kysymyksiä. Onko seuraavalla kasvukaudella havaittavissa muutoksia metaanivoissa käsitellyillä mittauspisteillä? Palautuuko metaanivuo ennalleen tallonnan jälkeen ja kuinka nopeasti? Mikä on papanoiden vaikutus turpeen mikrobistoon? Kokeen ja mittausten jatkaminen toivottavasti valottaa tietämystämme aiheesta ja antaa vastauksia esitettyihin kysymyksiin.

## Kiitokset

Tämä Pro gradu -työ on osa Luonnonvarakeskuksen (Luke) viisivuotista ACAP-tutkimushanketta (*Acclimation of arctic peatlands – through reindeer grazing – to a changing climate*), minkä mahdollistaa Suomen Akatemian rahoitus (315415). Suuri kiitos työn ohjauksesta ja kaikesta tuesta Päivi Mäkirannalle Lukesta. Kiitos myös Ilmatieteen laitokselle palkkauksesta kesän maastotöitä varten. Mika Korhosen tuki Ilmatieteen laitokselta oli myös korvaamatonta metaanivuolaskennoissa ja Tuomas Rajalan Lukesta puolestaan tilastanalyysien ja kuvaajien kanssa. Rauna Lilja INAR:ista toimitti osan työssä käytetystä kaasumittausaineistosta. Kiitos myös Timo Penttilälle sekä Hannu Fritzelle Lukesta työn tarkasta kommentoinnista. Työn vastuuprofessorina toimi Harri Vasander Helsingin yliopiston Metsätieteiden osastolta.

## Lähteet

- Aurela, M., Lohila, A., Tuovinen, J.-P., Hatakka, J., Riutta, T. & Laurila, T. (2009). Carbon dioxide exchange on a northern boreal fen. *Boreal Environment Research* 14(4): 699-710. ISSN 1797-2469. Saatavissa: <http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber14/ber14-699.pdf>
- Barthelemy, H., Stark, S. & Olofsson, J. (2015). Strong Responses of Subarctic Plant Communities to Long-Term Reindeer Feces Manipulation. *Ecosystems* 18: 740. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9856-y>
- Blodau, C. (2002). Carbon cycling in peatlands - A review of processes and controls. *Environmental Reviews* 10(2): 111-134. <https://doi.org/10.1139/a02-004>
- Brune, A., Frenzel, P. & Cypionka, H. (2000). Life at the oxic–anoxic interface: microbial activities and adaptations. *FEMS Microbiology Reviews* 24(5): 691-710. [https://doi.org/10.1016/S0168-6445\(00\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0168-6445(00)00054-1)
- Bubier, J. L., Moore, T. R., Bellisario, L., Comer, N. T. & Crill, P. M. (1995). Ecological controls on methane emissions from a Northern Peatland Complex in the zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochemical Cycles* 9(4): 455-470. <https://doi.org/10.1029/95GB02379>
- Coulthard, T. J., Baird, A. J., Ramirez, J. & Waddington, J. M. (2009). Methane dynamics in peat; importance of shallow peats and a novel reduced-complexity approach for modeling ebullition. *Geophysical Monograph Carbon cycling in northern peatlands* 184: 173-185. <https://doi.org/10.1029/2008GM000811>
- Dinsmore, K., Drewer, J., Levy, P., George, C., Lohila, A., Aurela, M. & Skiba, U. (2017). Growing season CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from a subarctic landscape in northern Finland; from chamber to landscape scale. *Biogeosciences* 14(4): 799-815. [doi:10.5194/bg-14-799-2017](https://doi.org/10.5194/bg-14-799-2017)
- Dise, N. B., Gorham, E. & Verry, E. S. (1993). Environmental factors controlling methane emissions from peatlands in northern Minnesota. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 98(D6): 10583-10594. <https://doi.org/10.1029/93JD00160>
- Drewer, J., Lohila, A., Aurela, M., Laurila, T., Minkkinen, K., Penttilä, T., Dinsmore, K. J., Mckenzie, R. M., Helfter, C., Flechard, C., Sutton, M. A. & Skiba, U. M. (2010).

Comparison of greenhouse gas fluxes and nitrogen budgets from an ombrotrophic bog in Scotland and a minerotrophic sedge fen in Finland. *European Journal of Soil Science* 61(5): 640–650. [doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01267.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01267.x)

Edwards, C., Hales, B. A., Hall, G. H., McDonald, I. R., Murrell, J. C., Pickup, R., Ritchie, D. A., Saunders, J. R., Simon, B. M. & Upton, M. (1998). Microbiological processes in the terrestrial carbon cycle: methane cycling in peat. *Atmospheric Environment* 32(19): 3247-3255. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00107-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00107-1)

Fisher, R. E., France, J. L., Lowry, D., Lanoisellé, M., Brownlow, R., Pyle, J. A., Cain, M., Warwick, N., Skiba, U. M., Drewer, J., Dinsmore, K. J., Leeson, S. R., Bauguitte, S. J.-B., Wellpott, A., O'Shea, S. J., Allen, G., Gallagher, M. W., Pitt, J., Percival, C. J., Bower, K., George, C., Hayman, G. D., Aalto, T., Lohila, A., Aurela, M., Laurila, T., Crill, P. M., McCalley, C. K. & Nisbet, E. G. (2017). Measurement of the <sup>13</sup>C isotopic signature of methane emissions from northern European wetlands. *Global Biogeochemical Cycles* 31(3): 605-623. <http://dx.doi.org/10.1002/2016GB005504>

GHG Measurement sites. (2018). [www-sivusto] Ilmatieteen Laitos. Saatavissa: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/GHG-measurement-sites>. [Viitattu: 4.3.2019].

Ghosh, A., Patra, P., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Etheridge, D., Sugawara, S., Kawamura, K., Miller, J., Dlugokencky, E., Krummel, P., Fraser, P., Steele, L., Langenfelds, R., Trudinger, C., White, J., Vaughn, B., Saeki, T., Aoki, S. & Nakazawa, T. (2015). Variations in global methane sources and sinks during 1910-2010. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15(5): 2595-2612. <https://doi.org/10.5194/acp-15-2595-2015>

Godin, A., McLaughlin, J. W., Webster, K. L., Packalen, M. & Basiliko, N. (2012). Methane and methanogen community dynamics across a boreal peatland nutrient gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 48: 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.018>

Hahn, J., Juottonen, H., Fritze, H. & Tuittila, ES. (2018). Dung application increases CH<sub>4</sub> production potential and alters the composition and abundance of methanogen community in restored peatland soils from Europe. *Biology and Fertility of Soils* 54(4): 533-547. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1279-4>

- Havaintojen lataus. (2020). [www-sivusto] Ilmatieteen Laitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>. [Viitattu 19.3.2020].
- Huttunen, J., Nykänen, H., Turunen, J. & Martikainen, P. (2003). Methane emissions from natural peatlands in the northern boreal zone in Finland, Fennoscandia. *Atmospheric Environment* 37: 147–151. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00771-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00771-9)
- Joabsson, A., Christensen, T. R. & Wallén, B. (1999). Vascular plant controls on methane emissions from northern peatforming wetlands. *Trends in Ecology & Evolution* 14(10): 385-388. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(99\)01649-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(99)01649-3)
- Kao-Kniffin, J., Freyre, D. S. & Balsler, T. C. (2010). Methane dynamics across wetland plant species. *Aquatic Botany* 93(2): 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2010.03.009>
- Kempainen, J., Kettunen, J. & Nieminen, M. (2003). Porotalouden taloustutkimusohjelma 2003-2007. Kala- ja riistaraportteja nro. 281: 56 s. + 2 liitettä. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:951-776-407-3>.
- King, J. Y., Reeburgh, W. S., Thieler, K. K., Kling, G. W., Loya, W. M., Johnson, L. C. & Nadelhoffer K. J. (2002). Pulse-labeling studies of carbon cycling in Arctic tundra ecosystems: The contribution of photosynthates to methane emission. *Global Biogeochemical Cycles* 16(4): 10-1-10-8. <https://doi.org/10.1029/2001GB001456>
- Kitti, H., Forbes, B.C. & Oksanen, J. (2009). Long- and short-term effects of reindeer grazing on tundra wetland vegetation. *Polar Biology* 32: 253–261. <https://doi.org/10.1007/s00300-008-0526-9>
- Koskinen, M., Minkkinen, K., Ojanen, P., Kämäräinen, M., Laurila, T. & Lohila, A. (2014). Measurements of CO<sub>2</sub> exchange with an automated chamber system throughout the year: challenges in measuring night-time respiration on porous peat soil. *Biogeosciences* 11: 347–363. <https://doi.org/10.5194/bg-11-347-2014>
- Kotiaho, M., Fritze, H., Merilä, P., Juottonen, H., Leppälä, M., Laine, J., Laiho, R., Yrjälä, K. & Tuttila, E.-S. (2010). Methanogen activity in relation to water table level in two boreal fens. *Biology and Fertility of Soils* 46: 567–575. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0461-0>

- Laiho, R., Penttilä, T. & Fritze, H. (2017). Reindeer droppings may increase methane production potential in subarctic wetlands. *Soil Biology and Biochemistry* 113: 260-262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.017>
- Laine, J., Vasander, H., Hotanen, J.-P., Nousiainen, H., Saarinen, M. & Penttilä, T. (2012). *Suotyypit ja turvekankaat – opas kasvupaikkojen tunnistamiseen*. Metsäkustannus Oy, Hämeenlinna. 160 s.
- Li, T., Raivonen, M., Alekseychik, P., Aurela, M., Lohila, A., Zheng, X., Zhang, Q., Wang, G., Mammarella, I., Rinne, J., Yu, L., Xie, B., Vesala, T. & Zhang, W. (2016). Importance of vegetation classes in modeling CH<sub>4</sub> emissions from boreal and subarctic wetlands in Finland. *Science of the Total Environment* 572: 1111-1122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.020>
- Ma, L., Zhong, M., Zhu, Y., Yang, H., Johnson, D. & Rong, Y. (2018). Annual methane budgets of sheep grazing systems were regulated by grazing intensities in the temperate continental steppe: A two-year case study. *Atmospheric Environment* 174: 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.024>
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus merkkipiireistä ja suurimmista sallituista poromääristä annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen 1 §:n muuttamisesta (857/2014). Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140857>. [Viitattu 13.3.2019].
- Moore, T., Roulet, N. & Knowles, R. (1990). Spatial and temporal variations of methane flux from subarctic/northern boreal fens. *Global Biogeochemical Cycles* 4(1): 29-46. <https://doi.org/10.1029/GB004i001p00029>
- Mörsky, S. K., Haapala, J. K., Rinnan, R., Saarnio, S., Suokanerva, H., Latola, K., Kyrö, E., Silvola, J., Holopainen, T. & Martikainen, P. J. (2012). Minor long-term effects of ultraviolet-B radiation on methane dynamics of a subarctic fen in Northern Finland. *Biogeochemistry* 108: 233–243. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9593-z>
- Nyström, A., Heikkinen, H. I. & Tolvanen, A. (2013). Soiden käyttö ja merkitys poronhoidossa Kiimingin, Kollajan, Pudasjärven ja Oijärven paliskunnissa vuonna 2011. *Metlan työraportteja* 258: 190-212. Saatavissa: [http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp258\\_6\\_190-212.pdf](http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp258_6_190-212.pdf).

- Paliskunnat. (2019). [www-sivusto] Paliskuntain yhdistys. Saatavissa: <https://paliskunnat.fi/poro/poronhoito/paliskunnat/>. [Viitattu 13.3.2019].
- Peltoniemi, K., Laiho, R., Juottonen, H., Bodrossy, L., Kell, D. K., Minkkinen, K., Mäkiranta, P., Mehtätalo, L., Penttilä, T., Siljanen, H. M.P., Tuittila, E-S., Tuomivirta, T. & Fritze, H. (2016). Responses of methanogenic and methanotrophic communities to warming in varying moisture regimes of two boreal fens. *Soil Biology and Biochemistry* 97: 144-156. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.03.007>
- Poronhoito Suomessa. (2017). [www-sivusto] Maa- ja metsätalousministeriö. Saatavissa: <https://mmm.fi/lisatietoja-poronhoidosta>. [Viitattu 13.3.2019].
- Poronhoitolaki (14.9.1990/848). Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1990/19900848>. [Viitattu 13.3.2019].
- Räsänen, A., Aurela, M., Juutinen, S., Kumpula, T., Lohila, A., Penttilä, T. & Virtanen, T. (2019). Detecting northern peatland vegetation patterns at ultra-high spatial resolution. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. <https://doi.org/10.1002/rse2.140>
- Saarnio, S., Alm, J., Silvola, J., Lohila, A., Nykänen, H. & Martikainen, P. J. (1997). Seasonal variation in CH<sub>4</sub> emissions and production and oxidation potentials at microsites on an oligotrophic pine fen. *Oecologia* 110(3): 414-422. <https://doi.org/10.1007/s004420050176>
- Salgado-Flores, A., Hagen, L. H., Ishaq, S. L., Zamanzadeh, M., Wright, A. G., Pope, P. B. & Sundset, M. A. (2016). Rumen and cecum microbiomes in reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) are changed in response to a lichen diet and may affect enteric methane emissions. *PLoS ONE* 11(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155213>
- Sánchez, M. G., Chimner, R., Hribljan, J., Lilleskov, E. & Suarez, E. (2017). Carbon dioxide and methane fluxes in grazed and undisturbed mountain peatlands in the Ecuadorian Andes. *Mires and Peat* 19(20): 1-18. <https://doi.org/10.19189/MaP.2017.OMB.277>
- Turetsky, M. R., Treat, C. C., Waldrop M. P., Waddington J. M., Harden J. W. & McGuire A. D. (2008). Short-term response of methane fluxes and methanogen activity to

water table and soil warming manipulations in an Alaskan peatland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113(G3).

<https://doi.org/10.1029/2007JG000496>

Turetsky, M., Kotowska, A., Bubier, J., Dise, N., Crill, P., Hornibrook, E., Minkinen, K., Moore, T., Myers-Smith, I., Nykänen, H., Olefeldt, D., Rinne, J., Saarnio, S., Shurpali, N., Tuittila, E., Waddington, M., White, J., Wickland, K., Wilmking, M. (2014). A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Global Change Biology* 20(7): 2183-2197.

<https://doi.org/10.1111/gcb.12580>

Turunen, J. (2008). Development of Finnish peatland area and carbon storage 1950-2000. *Boreal Environment Research* 13(4): 319-334. ISSN 1797-2469. Saatavissa:

<http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber13/ber13-319.pdf>

Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K., & Reinikainen, A. (2002). Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and subarctic regions. *The Holocene* 12(1): 69–80.

<https://doi.org/10.1191/0959683602h1522rp>

Waddington, J. M. & Roulet, N. T. (1996). Atmosphere-wetland carbon exchanges: Scale dependency of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> exchange on the developmental topography of a peatland. *Global Biogeochemical Cycles* 10(2): 233-245.

<https://doi.org/10.1029/95GB03871>

Van Der Wal, R., Bardgett, R. D., Harrison, K. A. & Stien, A. (2004). Vertebrate herbivores and ecosystem control: cascading effects of faeces on tundra ecosystems. *Ecography* 27(2): 242-252. Saatavissa:

<https://www.jstor.org/stable/3683835>

Vann, C. D., Megonigal, P. J. (2003). Elevated CO<sub>2</sub> and water depth regulation of methane emissions: Comparison of woody and non-woody wetland plant species.

*Biogeochemistry* 63, 117–134. <https://doi.org/10.1023/A:1023397032331>

Öquist, M. G. & Svensson, B. H. (2002). Vascular plants as regulators of methane emissions from a subarctic mire ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107(D21).

[https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(99\)01649-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(99)01649-3)